Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)

International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering (MPCPE-2025)

СБОРНИК ТРУДОВ
VI МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ

28-30 апреля 2025 года
г. Владимир, Российская Федерация

Владимир
АРКАИМ
2025

УДК 624 + 691
ББК 38.5
В21

***Редакционная коллегия*:**

Н. И. Ватин – доктор технических наук, профессор, директор научно-технологического комплекса «Цифровой инжиниринг в гражданском строительстве» СПбПУ (*ответственный редактор*)

С. И. Рощина – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Строительные конструкции» ВлГУ

Е. С. Прусов – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии функциональных и конструкционных материалов» ВлГУ

В21 International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering (MPCPE-2025): сб. тр. VI междунар. науч.-техн. конф. 28 – 30 апр. 2025 г., Владимир, Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Аркаим, 2025. – 436 с.

ISBN 978-5-93767-580-4

В сборнике представлены материалы по различным направлениям научных и научно-практических исследований в области строительства и материаловедения, включая численно-аналитические методы расчета конструкций, зданий и сооружений, конструкционные и функциональные материалы и технологии, проектирование и эксплуатация строительных конструкций и инженерных систем, использование достижений прикладной физики в строительстве и смежных отраслях, а также актуальные вопросы энерго- и ресурсосбережения.

Представляют интерес для ученых и практикующих специалистов, работающих в сфере строительства и в смежных отраслях. Могут быть полезны обучающимся по профильным направлениям подготовки.

УДК 624 + 691
ББК 38.5

ISBN 978-5-93767-580-4

© Коллектив авторов, 2025
© ВлГУ, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Андреяшкин Я.В., Чибрикин Д.А., Распопина М.М. Клеевое соединение древесины и стержневой арматуры ……... 7
Безруких О.А. Индустриализация малоэтажного жилищного строительства (на примере Иркутской области) …….. 14
Белаш Т.А., Богомазов А.Б. Анализ конструктивных решений по снижению негативного влияния наводнений на строительные конструкции зданий и сооружений …… 23
Белаш Т.А., Чудаков А.А. Влияние природных и техногенных воздействий на конструкции покрытий зданий и сооружений ……..... 31
Беляев Н.Д., Волкова Ю.В., Скворцова О.С. Особенности струи от движителя судна при наличии рулевого устройства ……. 38
Булучевская А.Д., Беляева Н.О., Сухарева К.В. Композиционные полимерные материалы на основе этиленвинилацетата со слоистыми и сферическими наполнителями …….…… 45
Бурминский А.В., Марутян А.С. «Шуховские штрихи» кисловодского курзала ……..…….. 52
Вихрев А.В., Кандрашкина Ю.С. Инновационные подходы к анализу и мониторингу движения автотранспорта на дорогах регионального значения …….. 60
Волик А.Р., Алексеев Д.Д., Орловский А.П. Соединения нагельного типа деревянных элементов с использованием стеклопластиковой арматуры ……..……... 71
Волик А.Р., Борель А.А., Цидик Е.И. Экспериментальное исследование клееных деревянных балок, усиленных композитными материалами ……. 77
Гоньшаков А.Г., Крячко В.Р., Ощепкова Е.С. Оценка технического состояния покрытия здания спортивного зала 1963 года постройки ……. 83
Гоньшаков Н.Г., Крячко В.Р. Техническое обследование ограждающих конструкций здания спортивного зала 60-х годов постройки ……... 88
Гравит М.В., Прусаков В.А., Котлярская И.Л. Огнезащитные рулонные композитные покрытия ……..……... 93
Давиденко М.А., Давиденко Н.А., Репин В.А. Повышение энергоэффективности многоэтажного жилого здания ……. 98
Ильина Л.В., Вишняков Н.С., Шихалев А.Е. Влияние упрочняющей добавки на прочность цементных бетонов …… 104
Ильина Л.В., Цекарь Д.А., Колесников П.А. Моделирование процессов схватывания цементных систем ……..… 112

Коваль П.С., Кушнир А.Э., Трунина Ю.В. Зависимость модуля деформаций LVL от режимов нагружения ……..……. 120
Коновалова В.С., Строкин К.Б., Гальцев А.А., Новиков Д.Г. Снижение деструкции бетона при воздействии грибков Aspergillus niger в условиях увлажнения посредством комбинированной добавки ……...…….. 128
Котлярская И.Л., Носова А.О., Успенская М.В. Термочувствительные гидрогели для индикации перегрева строительных конструкций ……. 136
Котлярская И.Л., Успенская М.В., Ватин Н.И. Библиометрическое картирование научных исследований по термочувствительным материалам ……. 142
Котова Е.В., Данилов Е.В. Оценка несущей способности кружальных LVL-конструкций с использованием метода конечных элементов ……..…… 148
Кравченко В.В. Моделирование эффективных жесткостных характеристик цементного камня при вязкоупругом поведении методами численной гомогенизации …….. 154
Крюков А.В., Лисятников М.С., Рощина С.И. Исследование прочностных характеристик полимерных композитов модифицированных армирующим стекловолокном ……. 163
Крюков Д.Б. Аспекты применения алюминиевых броней в современных системах вооружений …….. 172
Крюкова Е.А., Рева Д.В., Васильева А.А. Анализ и сравнение бетонов с добавлением бактерий способствующих самозакаливанию трещин ……...……... 180
Кузнецова О.Г., Решетников М.К. Опыт использования программного комплекса Renga …….……. 187
Лабудин Б.В., Тарасов В.Л. Грузозахватные приспособления для строповки конструкций CLT ……..……... 196
Латыпов В.М., Нафиков К.Д., Нестеров К.М,, Луцык Е.В., Латыпова Т.В., Зайцева Л.Р. Агрегатное состояния и структура поверхности микро- и нанокарбоната кальция – эффективной добавки для повышения сульфатостойкости бетона …… 204
Лисятников М.С., Львова А.М. Сейсмостойкость узла стыка нижнего пояса металлической фермы …….. 212
Лисятников М.С., Михно К.С. Исследование эффективности применения облегчённых предварительно напряжённых железобетонных монолитных перекрытий …….…… 219
Мартынов В.А., Кузина А.Н. Методы усиления существующих строительных конструкций на устойчивость к прогрессирующему обрушению ……..……. 227

Медведев Е.К., Гоньшаков А.Г., Куприянов А.Е. Оценка состояния покрытия производственного здания фармацевтического назначения ……..... 235
Медведев Е.К., Гоньшаков Н.Г., Крячко В.Р. Оптимизация свайного основания жилого комплекса с подземной автостоянкой ... 241
Мясников Д.О., Михно К.С., Ощепкова Е.О. Напряжено-деформированное состояние облегченной железобетонной балки .. 247
Овчаренко В.А., Петров П.О., Жуков И.А., Гаркушин Г.В., Савиных А.С., Разоренов С.В. Экспериментальное исследование динамической прочности массивных образцов бетона …… 252
Павлова И.П., Лизогуб А.А., Лизогуб И.В. Модификация бетонного композита на основе минеральных вяжущих и рециклингового заполнителя …….. 258
Попова М.В., Аминов М.А. Легкая стальная ферма для большепролетных зданий ……..……. 265
Попова М.В., Аминов М.А., Тимин Е.М. ТИМ. Перспективы развития в Российской Федерации ……..... 270
Попова М.В., Ханбабаева А.А. Методика выбора конструктивного каркаса здания на основе многофакторного анализа ……... 275
Рева Д.В., Васильева А.А. Кинетический анализ процессов межфазного взаимодействия алюминиевого расплава с хромом ……. 282
Рева Д.В., Деев В.Б., Прусов Е.С. Расчетная оценка процессов формирования диффузионной зоны при высокотемпературном контакте в системе Al-V ……...…….... 289
Рева Д.В., Катрецкая В.А. Анализ новых антикоррозионных покрытий для металлических конструкций ……..…. 295
Репин В.А., Аминов М.А., Ребриков А.Л. Прочность и деформативность промышленных железобетонных труб в зависимости от условий эксплуатации ……..…. 303
Репин В.А., Репин А.В., Плотников А.Н. Современные методы диагностики технического состояния промышленных эстакад …….. 311
Римшин В.И., Кецко Е.С., Кузина И.С. Комплексный контроль технического состояния здания производственного назначения ….. 316
Сергеев М.С., Аминов М.А. Реконструкция здания со сводчатыми перекрытиями ……..……. 325
Сергеев М.С., Мясников Д.О., Куприянова Ю.В. Реконструкция покрытия производственного здания дореволюционной постройки .. 332
Стрекалкин А.А., Распопина М.М. Оценка эффективности усиления конструкции монолитной плиты перекрытия, подвергшейся воздействию пожара, с помощью композитного материала на основе углеродного волокна ……..…….. 338
Тошмукумов Б.Ж. Технологии повышения устойчивости и прочностных свойств грунтов в районе склонов …….. 346

Тужилова М.В., Баранов Д.С., Лисятников М.С. Физико-химический анализ различных видов мелкого заполнителя в бетонных смесях ……...……... 353
Тужилова М.В., Щеглова П.А., Лисятников М.С., Рощина С.И. Использование резиновой крошки в качестве частичной замены мелкого заполнителя в бетоне ……. 360
Усов А.С., Лисятников М.С., Стрекалкин А.А., Рощина С.И. Несущие строительные конструкции из ДПК: тенденции и перспективы ……..…….... 367
Фадеев Р.Н., Лисятников М.С., Рощина С.И. Расчет клееных деревянных балок с перекрестно-ориентированными слоями в ПК «Лира» …….. 375
Чибрикин Д.А., Катрецкая В.А. Влияние деформации сдвига на конструкции при проектировании многоэтажных зданий ……. 384
Чибрикин Д.А., Рева А.А. Анализ напряженно-деформированного состояния армированных деревянных балок методом конечных элементов …….……. 393
Чибрикин Д.А., Стрекалкин А.А. Особенности проектирования, эксплуатации и усиления деревянных стропильных конструкций …. 402
Чибрикин Д.А., Фетисов М.М. Комплексный подход к исследованию напряженно-деформированного состояния сталей в строительных конструкциях ……..…. 408
Шабалдин И.В., Рева Д.В., Прусов Е.С. Моделирование кинетики взаимодействия твердого титана с алюминиевым расплавом ……. 413
Шалимов А.Д., Прусов Е.С. Современные методы моделирования процессов кристаллизации и структурообразования алюминиевых сплавов …….. 422

УДК 69.07

КЛЕЕВОЕ СОЕДИНЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ И СТЕРЖНЕВОЙ АРМАТУРЫ

Андреяшкин Яков Владимирович*, аспирант кафедры строительных конструкций, **Чибрикин Данила Александрович**, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций, **Распопина Марина Максимовна**, магистрант кафедры строительных конструкций

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), mckealot@yandex.ru

Аннотация. В данной статье описано экспериментальное исследование клеевых соединений различных видов арматурных стержней с древесиной в различном конструктивном исполнении. Применение чистой эпоксидной смолы в соединениях древесины и стержневой арматуры было признано несостоятельным ввиду слабых сцепляющих свойств клеевого состава. В состав усиленного клея на основе эпоксидной смолы включен кварцевый песок, что, согласно проведенным исследованиям, придает клеевому соединению дополнительную прочность. Новизна данного исследования заключается в выявлении и описании адгезивных свойств усиленного клеевого состава с разными видами арматурных стержней в цельных и клееных деревянных элементах. Результаты испытаний могут служить подспорьем для дальнейших исследований, связанных с клеевыми соединениями арматуры и древесины и прочностью армированных деревянных конструкций.
Ключевые слова: адгезия; арматурные стержни; деревянные конструкции; древесина; клей; клеевое соединение; стальная арматура; стеклопластиковая арматура; эпоксидная смола.

ADHESIVE CONNECTION OF WOOD AND CORE REINFORCEMENT

Andreyashkin Yakov Vladimirovich*, Postgraduate Student, **Chibrikin Danila Alexandrovich**, Ph.D., Associate Professor of the Department of Building Structures, **Raspopina Marina Maksimovna,** Master's student of the Department of Building Structures

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), mckealot@yandex.ru

Abstract. This article describes an experimental study of adhesive joints of various types of reinforcing rods with wood in various designs. The use of pure epoxy resin in wood and core reinforcement joints was considered untenable due to the weak

bonding properties of the adhesive composition. Quartz sand is included in the composition of the reinforced epoxy resin-based adhesive, which, according to research, gives the adhesive joint additional strength. The novelty of this study lies in the identification and description of the adhesive properties of a reinforced adhesive compound with different types of reinforcing rods in solid and glued wooden elements. The test results can serve as an aid for further research related to the adhesive joints of reinforcement and wood and the strength of reinforced wooden structures.
Keywords: adhesion; adhesive joint; epoxy resin; fiberglass reinforcement; glue; reinforcing rods; steel reinforcement; wood; wooden structures.

Введение

Армирование все чаще применяется в строительстве из древесины. Использование армирующих элементов повышает прочность и жесткость деревянных конструкций на различные виды напряженно-деформированных состояний и позволяет применять древесину в качестве материала для ответственных и высокопрочных конструкций. Армирующие элементы представлены в виде разнообразных материалов – стальных и композитных стержней и сеток, композитных лент и тканей, и т.п. [1-5].

Наиболее широко распространено армирование стальными и композитными стержнями, поскольку они относительно недороги и более доступны среди прочих армирующих элементов и при этом дают увеличение прочностных и деформационных характеристик деревянных конструкций [6-7]. Тем не менее, исследования в области стержневого армирования деревянных конструкций остаются актуальными. Одна из проблем армирования деревянных конструкций заключается в обеспечении надлежащей прочности клеевого соединения арматуры и древесины. Среди клеев, используемых в склеивании арматуры с древесиной, наибольшее распространение получили клеи на эпоксидной смоле ввиду доступности, относительно низкой стоимости и высокой адгезией со сталью [8]. Тем не менее, собственная прочность клея на эпоксидной смоле исчерпывается скорее, чем адгезионная прочность клея и стальной арматуры [9]. Разрушение клеевого соединения по древесине при выдергивании арматуры происходит при нагрузке, не превышающей прочности древесины, и сопровождается переходом в упруго-пластичный характер деформаций [10]. Исследование различных клеев, обладающих адгезией со сталью, показывает низкую прочность эпоксидного клея относительно полиуретанового и акрилового клея [11]. Кроме того, результаты наблюдений показывают слабую адгезию эпоксидного клея со стеклопластиковой арматурой, что объясняется гладкой поверхностью застывшего эпоксидного клея и стеклопластиковых стержней [12]. Поскольку стеклопластиковая арматура находит применение в строительстве из древесины, клеевое соединение с ней требует улучшения.

В качестве решения вышеописанных проблем предложено усиление клеевого соединения при помощи добавления в клеевой состав кварцевого

песка [13-14]. Застывший усиленный клей будет иметь шероховатую поверхность, что повысит адгезионные свойства со стеклопластиковой арматурой, а его прочность увеличится за счет превращения в композит с кварцевой матрицей и эпоксидным связующим.

Экспериментальное исследование

В рамках изучения поведения клеевого состава при выдергивании арматуры было проведено экспериментальное исследование. Испытанию на выдергивание подверглись 5 серий по 5 образцов. Серии были замаркированы следующим образом: БАД-Ө – цельнодеревянные образцы со стальной арматурой периодического профиля без усиления клеевого состава; БАД-0 – цельнодеревянные образцы со стальной арматурой периодического профиля с усиленным клеевым составом; БАД-1 – клееные деревянные образцы со стальной арматурой периодического профиля с усиленным клеевым составом; БАД-2 – цельнодеревянные образцы с гладкой стальной арматурой с усиленным клеевым составом; БАД-3 – цельнодеревянные образцы со стеклопластиковой арматурой с усиленным клеевым составом. Образцы представляют собой бруски сечением 50х50 мм и длиной 200 мм с выпусками арматуры (рис. 1).

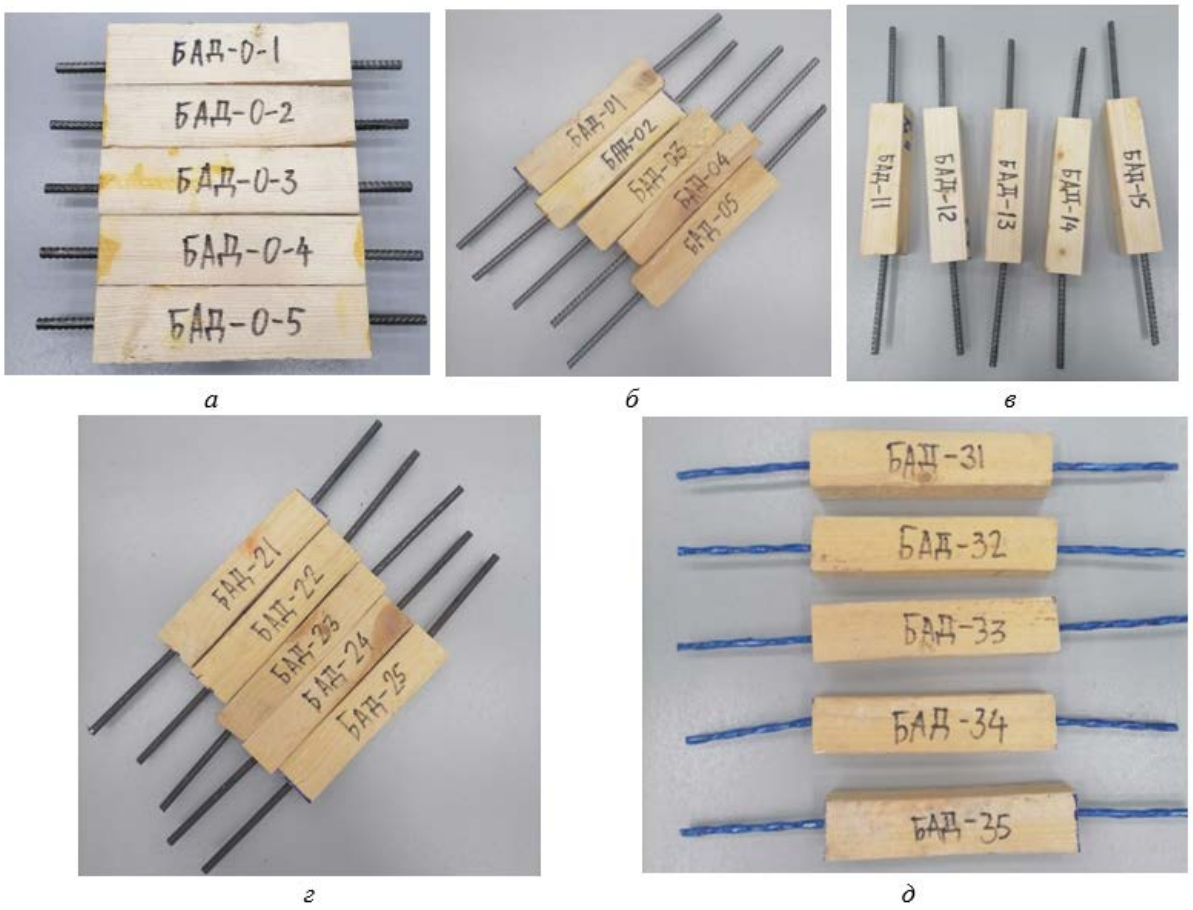


Рис. 1. Испытуемые образцы: а – БАД-Ө, б – БАД-0, в – БАД-1, г – БАД-2, д – БАД-3

Материал всех брусков – сосна 2 сорта естественной влажности. Образцы серии БАД-1 состоят из половинок бруса 50х50 мм, склеенных между собой с целью изучить влияние шва клееного бруса на прочность клеевого соединения. Арматурные стержни заводились в заранее высверленные глухие отверстия на глубину 80 мм (образцы БАД-Ө – на глубину 50 мм). Класс прочности стальной арматуры периодического профиля – А500, гладкой стальной арматуры – А240. Диаметр всех арматурных стержней составляет 8 мм. Исходный клеевой состав представляет собой эпоксидную смолу ЭД-20, смешанную с отвердителем ПЭПА в соотношении 100:10 массовых частей. Усиленный клеевой состав представляет собой эпоксидную смолу ЭД-20, смешанную с отвердителем ПЭПА в соотношении 100:12:300 массовых частей. Время высыхания образцов составило более 2 суток.

Образцы были испытаны на разрывной машине РЭМ-100 при постоянно возрастающей нагрузке. Образцы БАД-Ө хронологически были испытаны первыми и повлияли на решение об усилении клеевого состава и увеличении глубины защемления арматуры в остальных образцах. Выдергивание арматуры сопровождалось переходом в упруго-пластичный характер напряженно-деформированного состояния образцов. Визуального разрушения древесины не было обнаружено. Кроме того, глубина защемления образцов 50 мм оказалась недостаточной и повлияла на графические результаты испытания (подробнее в разделе «Обсуждение результатов»). Приобретенный опыт учитывался при изготовлении образцов остальных серий. На рисунке 2 изображены образцы всех серий после испытаний.

В образцах серий БАД-0, БАД-1 и БАД-3 происходило хрупкое разрушение с образованием трещин в древесине, при этом разрушение клеевого соединения в образцах БАД-0 и БАД-1 происходило по контакту «клей-древесина», а в образцах БАД-3 по контакту «клей-арматура». Таким образом подтвердилось положение о слабой адгезии клея со стеклопластиковой арматурой. В образцах серии БАД-2 также происходило хрупкое разрушение, однако без образования трещин, но с отрывом древесных волокон. Данный характер разрушения, вероятно, связан с недостаточным сцеплением древесины и гладкой арматуры, чтобы при выдергивании арматуры вызвать разрушение древесины. В образцах с арматурой периодического профиля дополнительным фактором сцепления древесины и арматуры служат ребра, формирующие периодический профиль.

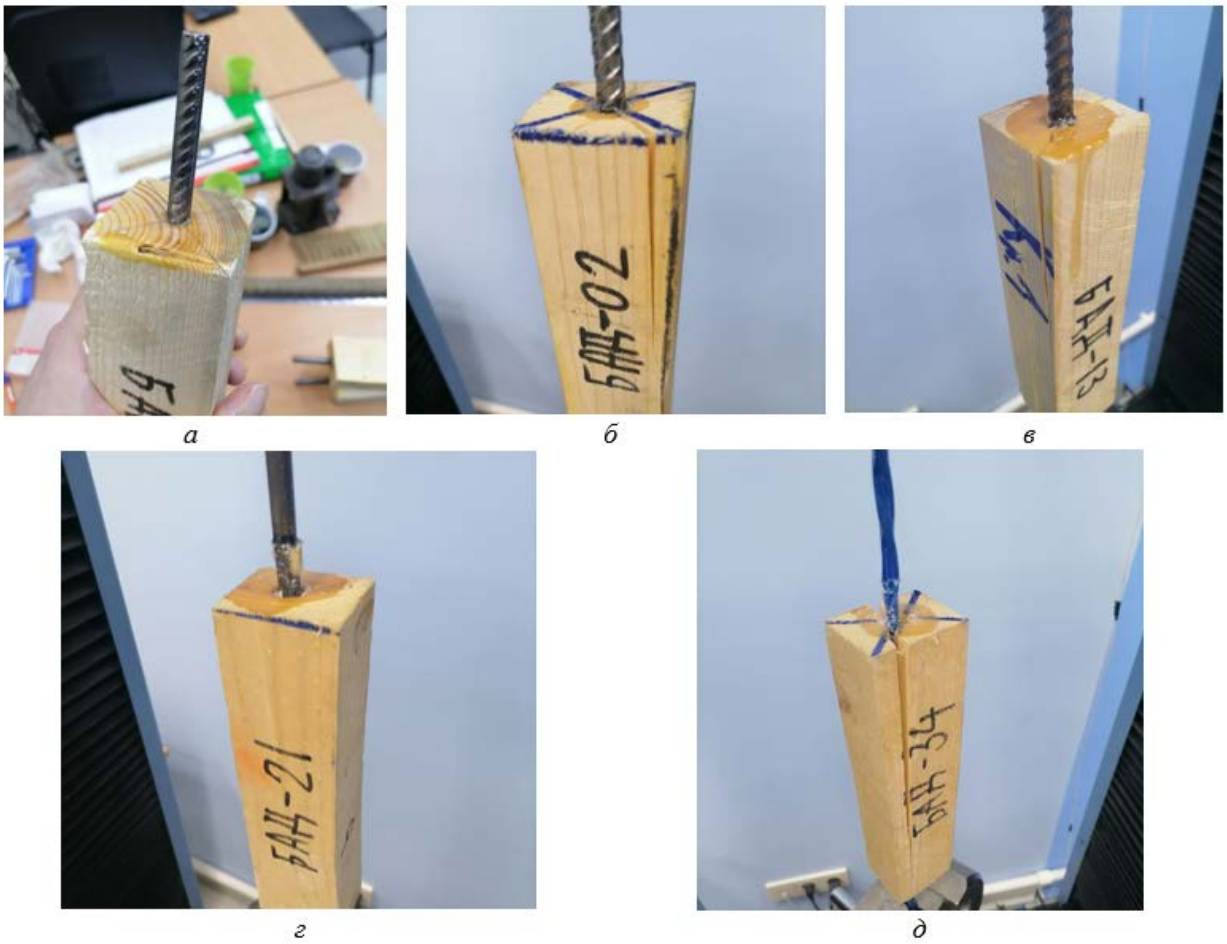


Рис. 2. Образцы после испытаний: а – БАД-Ө, б – БАД-0, в – БАД-1, г – БАД-2, д – БАД-3

Обсуждение результатов

По итогам проведенных испытаний удалось получить значение разрушающей нагрузки для всех образцов в каждой серии. Для образцов БАД-Ө также было получено значение нагрузки, вызывающей выдергивание арматуры и переход в упруго-пластичный характер разрушения. Для данной нагрузки в настоящей работе принято понятие «критическая нагрузка». Для остальных образцов значение критической нагрузки совпадает с разрушающей нагрузкой. Значения критической и разрушающей нагрузок сведены в табл. 1.

Наибольший разброс результатов был обнаружен на графике образцов БАД-Ө с вариацией 0,48 для критической нагрузки и 0,34 для разрушающей. Это связано с недостаточной глубиной защемления арматурных стержней. Среди наименее различающихся результатов можно выделить образцы серии БАД-2 и БАД-3. Образцы серии БАД-1 показали высокий разброс результатов даже при увеличенной глубине защемления стержней, что свидетельствует о все сохраняющейся недостаточности глубины защемления и требовании ее увеличить.

Таблица 1. Критические и разрушающие нагрузки для всех образцов

Образцы	Нагрузка, кН					Среднее значение	Коэффициент вариации
	1	2	3	4	5		
БАД-Ө, критическая	5,9	3,5	11,4	4,5	9,0	6,9±3,28	0,48
БАД-Ө, разрушающая	12,1	4,7	11,4	8,9	13,2	10,1±3,39	0,34
БАД-0	12,3	10,2	10,8	6,37	12,5	10,4±2,47	0,24
БАД-1	14,6	7,23	12,5	12,6	10,5	11,5±2,79	0,24
БАД-2	11,6	9,37	9,42	10,2	11,3	10,4±1,04	0,1
БАД-3	4,48	4,55	4,88	3,9	4,89	4,5±0,4	0,09

При анализе максимальных значений нагрузки, выдерживаемой всеми образцами за исключением образцов БАД-Ө, наибольшая прочность обнаружилась у образцов БАД-1 с клееной древесиной. Это может быть связано с увеличением зоны концентрации напряжений по границам стыка половинок бруса, в результате чего сдвиговые напряжения распределяются по большей площади и легче гасятся сопротивлением клеевого состава сдвигу. Далее по убыванию прочности идут образцы БАД-0 и БАД-2 с незначительной разницей в максимальной выдерживаемой нагрузки. Образцы серии БАД-3 показали прочность, в 2…2,5 раза меньшую прочности образцов вышеперечисленных серий, что подтверждает низкую адгезию клеевого состава со стеклопластиковой арматурой.

Заключение

Применением усиленного клеевого состава удалось добиться упругой работы и хрупкого разрушения образцов с использованием как стальных, так и стеклопластиковых арматурных стержней. Также в процессе исследования были выявлены особенности клеевого соединения древесины с различными видами стержней, которые требуют дополнительного изучения. К таким особенностям относится выбор оптимальной глубины защемления стержня в клееной древесине для испытаний на выдергивание и повышения адгезии эпоксидного клея со стеклопластиковыми стержнями.

Список использованной литературы

1. Кавелин А.С., Тютина А.Д., Нуриев В.Э., Колтакова В.А. Армирование деревянных конструкций // Инженерный вестник Дона. 2019. №8(59). С. 44.

2. Lisyatnikov M.S., Chibrikin D.A., Prusov E.S., Roshchina S.I. Mechanical characteristics of polymer composites based on epoxy resins with silicon carbide // Construction Materials and Products. 2024. Т.7. №5.

3. Repin V.A., Lukina A.V., Strekalkin A.A. Parameterization of Maxwell-Cremona diagram for determining forces in elements of a scissors truss // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2024. Т.20. №2. С. 97-108.

4. Лисятников М.С., Чибрикин Д.А., Прусов Е.С., Терентьев К.М., Рощина С.И. Прочностные характеристики полимерных композиционных материалов для строительных конструкций // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2025. №2(794). С. 139-150.

5. Чибрикин Д.А., Лукин М.В., Лукина А.В., Тюрикова Т.В., Рощина С.И. Численное исследование напряженно-деформированного состояния модифицированной деревянной балки // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2022. №3(387). С. 167-178.

6. Zhang H., Li H., Dauletbek A., Lorenzo R., Corbi I., Corbi O. Research status of glued-in rods connections in wood structures // Journal of Building Engineering. 2023. Т. 65. С. 105782.

7. Линьков В.И. Повышение несущей способности соединений на наклонных ввинченных стержнях // Инженерный вестник Дона. 2020. №11(71). С. 339-346.

8. Uehara F., Matsumoto A. Metal-resin bonding mediated by epoxy monolith layer // Applied Adhesion Science. 2016. №4. С.18.

9. Веттегрень В.И., Мамалимов Р.И., Савицкий А.В., Щербаков И.П., Сытов В.В., Сытов В.А. Природа адгезионной связи между эпоксидным клеем и сталью // Журнал технической физики. 2014. №3(84). С. 33-36.

10. Есипов А.В., Еренчинов С.А., Черных К.В. Учет податливости клеевого соединения арматуры и древесины в армированных деревянных балках // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2020. №4(40). С. 29-40.

11. Есипов А.В., Черных К.В. Экспериментальные исследования клеевого соединения древесины и стальной арматуры в лабораторных условиях // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: сборник трудов конференции. 2019. С. 100-104.

12. Цыбакин А.В., Титунин А.В., Цветков А.А. Армирование деревянных балок композитной арматурой // Современное строительство и архитектура. 2023. №3(34). С. 17-20.

13. Щуко В.Ю., Рощина С.И. Армированные деревянные конструкции в строительстве: учеб. пособие. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та. 2002. 66 с.

14. Щуко В.Ю., Рощина С.И. Клееные армированные деревянные конструкции: учеб. пособие. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та. 2008. 68 с.

УДК 332.81

ИНДУСТРИАЛИЗАЦИЯ МАЛОЭТАЖНОГО ЖИЛИЩНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА (НА ПРИМЕРЕ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ)

Безруких Ольга Андреевна, старший преподаватель кафедры экспертизы и управления недвижимостью

Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 89, 664074, Российская Федерация), olga.bezrukikh11@gmail.com

Аннотация. В рамках текущих тенденций, сегмент малоэтажного домостроения выступает в качестве ключевого тренда развития жилищного строительства. Целью исследования является определение эффективных конструктивных решений, применяемых в малоэтажном жилищном строительстве, отвечающих требованиям адаптивности, ресурсной устойчивости и системности. В статье проанализированы современные технологии и материалы, применяемые в малоэтажном жилищном строительстве, и выявлены наиболее перспективные материалы для строительства таких домов. Результаты показывают, что железобетонные панели являются оптимальным выбором, так как они демонстрируют наилучшие показатели по долговечности, срокам возведения и объёму отделочных работ, и локальное производство панелей обеспечивает их доступность. На основе полученных результатов, авторами разработаны рекомендации по развитию рынка железобетонных панелей в регионе. Полученные данные имеют стратегическое значение для формирования региональной политики в сфере жилищного строительства, направленной на повышение доступности жилья, энергоэффективности и устойчивости инфраструктуры с учетом климатических особенностей региона.

Ключевые слова: жилищное строительство, технико-экономические показатели, строительные материалы, надежность, железобетонные панели, доступность

INDUSTRIALIZATION OF LOW-RISE HOUSING CONSTRUCTION (USING THE EXAMPLE OF THE IRKUTSK REGION)

Bezrukikh Olga Andreevna, Senior Lecturer, Department of Real Estate Expertise and Management

Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Lermontov St., 89, 664074, Russian Federation), olga.bezrukikh11@gmail.com

Abstract. In the context of current trends, the low-rise housing construction segment acts as a key trend in the development of housing construction. The purpose of the study is to form a concept for selecting building materials for low-rise construction, based on the goals of the management system, taking into account their organizational and technological reliability at all stages of the life cycle. The article analyzes modern technologies and materials used in low-rise housing construction, and identifies the most promising materials for the construction of such houses using the hierarchy analysis method, the application of which will allow choosing the optimal materials in accordance with the climatic conditions of the region, cost characteristics, and also capable of satisfying the needs of the population for comfortable, environmentally friendly and affordable housing, which correlates with the provisions of the national projects of the Russian Federation.
Keywords: housing construction, technical and economic indicators, building materials, reliability, hierarchy method, reinforced concrete panels.

Введение

На данный момент в России на общий объём жилого строительства более половины приходится на малоэтажное жильё, так доля ввода малоэтажного жилья с 2020 года по 2024 выросла с 58% до 65%, и ежегодный прирост в среднем составил более 4%. Существующий рост доли малоэтажного строительства, в первую очередь поддерживается правительством Российской Федерации. Так, с 1 января 2025 года запущен новый национальный проект «Инфраструктура для жизни», направленный на развитие данного рынка и модернизацию инфраструктуры. Целью проекта является создание комфортной и безопасной городской среды, улучшение качества жизни граждан и развитие транспортной и социальной инфраструктуры. Весомая доля в данном национальном проекте отводится поддержке малоэтажного жилищного строительства через формирование субсидий и низкой процентной ставки по ипотечному кредитованию для граждан, желающих построить собственный дом, формирование механизма комплексного обеспечения земельных участков необходимой инфраструктурой. При этом Правительство заинтересовано в использовании современных технологий в строительстве, что отмечается рядом введенных программ и субсидий, направленных на экологичное строительство. В связи с этим, является актуальным исследование технологий малоэтажного строительства и определение наиболее перспективной технологии для определенного региона страны, исходя из климатических и градостроительных ограничений и основанной на потребительском спросе

Методы

Главные тенденции рынка малоэтажного строительства, вопросы стратегического управления рассмотрены в работах Казакова Ю.Н. Филюшкиной К.Э., Гусаковой, Н. В., Шипиловой. Н. А. и др.

Функционирование рынка малоэтажного строительства исследовано в работах отечественных авторов, таких как Е.В. Синякова, А.А. Султанов, Н.И. Морозова, и др. [1,2]. В большей степени в статьях рассмотрены вопросы государственного регулирования, технологических инноваций, потребительского спроса и региональных особенностей развития ИЖС. Например, в исследовании А.А. Султанова и Н.И. Морозовой [2] («Развитие рынка индивидуального жилищного строительства: российские и мировые тренды») акцент сделан на роли государства в стимулировании ИЖС через льготную ипотеку, цифровизацию процессов и адаптацию зарубежного опыта субурбанизации. Авторы подчеркивают, что рост доли малоэтажного строительства в России (до 58% в 2023 г.) связан не только с потребительскими предпочтениями, но и с мерами поддержки, такими как снижение ставок по ипотеке и упрощение земельных аукционов. В работе Е.В. Синяковой [1] («Инновационный сценарий развития рынка ИЖС») есть дополнение что, выделяя три ключевых направления: внедрение энергоэффективных технологий, государственное регулирование инфраструктуры и формирование новой жилищной политики, основным барьером для инноваций остается недоверие потребителей к новым материалам из-за отсутствия стандартизации и сертификации. Указанные научные тренды имеют весомое значения, однако в свою очередь, требуют дополнения в контексте отдельного региона, с учетом его климатических и территориальных характеристик.

Результаты и обсуждение

По данным территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Иркутской области, общий объем ввода жилья на территории Иркутской области на 1 февраля 2025 года составил 209,1 тыс. кв. м (13,8% от установленного плана и 128,7% к аналогичному периоду к 2024 года), в том числе: многоквартирные дома – 7,2 тыс. кв. м (3,4% от общего ввода); индивидуальное жилищное строительство – 201,9 тыс. кв. м (96,6% от общего ввода) (Рис.1) [3].

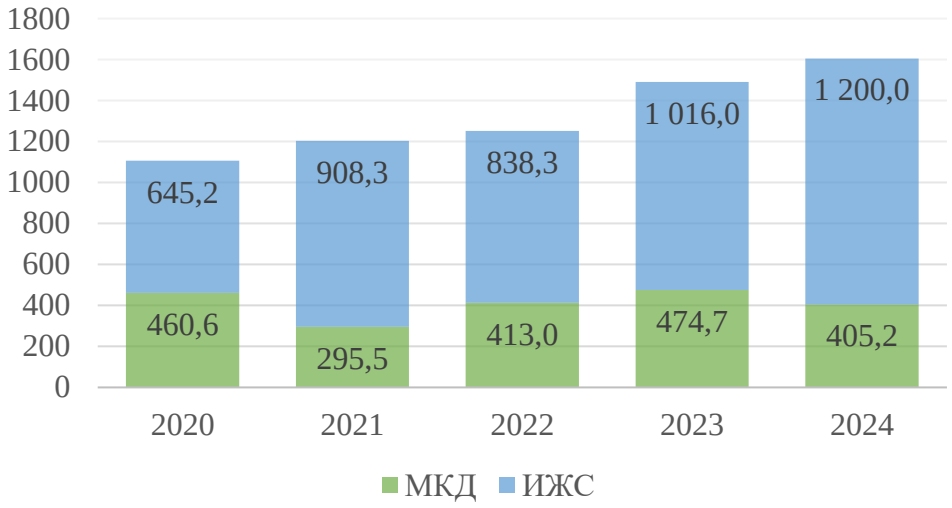


Рис. 1. Ввод жилья в Иркутской области с 2020 по 2024 года.

Согласно данным графика, можно отметить, что в Иркутской области с 2020 по 2024 годы наблюдается рост ввода жилья, а также доля индивидуального жилищного строительства увеличивается. В 2020 году объем ввода ИЖС составил 645,2 тыс. $м^2$., а к 2024 году он вырос до 1 200,0 тыс. $м^2$. Доля ИЖС в общем объеме ввода жилья также увеличилась: если в 2020 году она составляла около 58%, то к 2024 году достигла 65% [3, 4].

К факторам, оказывающим влияние на развитие рынка ИЖС, можно отнести:

1. **Государственную поддержку.** Введение льготных ипотечных программ, а также субсидирование, сделали строительство более доступным для населения.
2. **Изменение потребительских предпочтений.** Пандемия COVID-19 и переход на удаленный режим работы способствовали росту спроса на загородное жилье, где люди могли совмещать работу и отдых в комфортных условиях [5].
3. **Политику кредитования.** Рост доходов населения и доступность кредитных ресурсов также играют роль в увеличении объемов ИЖС.

Рост доли ИЖС в Иркутской области обусловлен мерами государственной поддержки и изменением социально-экономических условий, это делает индивидуальное жилищное строительство одним из основных направлений развития жилищного рынка региона.

Однако, ИЖС, как и любой формат жилья имеет свои преимущества и недостатки, которые важно учитывать при выборе типа недвижимости. В таблице 1 описаны основные преимущества и недостатки ИЖС (Табл.1).

Таблица 1. Плюсы и минусы ИЖС.

Преимущества ИЖС	**Недостатки ИЖС**
– Индивидуальность-возможность самостоятельной проектировки дома, планировки и выбора материала. – Экологичность-ИЖС как правило располагаются в экологически чистых районах за пределами городов [6]. – Возможность расширения и перестройки- со временем есть возможность расширить дом или участок, это позволить адаптировать жильё к изменяющимся условия жизни.	– Необходимость инфраструктуры- в отдалённых районах может отсутствовать инфраструктура, из-за чего проживание может быть менее комфортным – Высокие первоначальные затраты-строительство дома требует больших финансовых вложений, начиная от покупки земельного участка, до проектирования и строительства. – Самостоятельное обслуживание-владелец ИЖС несет самостоятельную ответственность за содержание дома, ремонт и коммунальные услуги, а из-за высокой отдалённости от населённых пунктов это может быть финансово обременительно. [7]

В условиях роста интереса к индивидуальному жилому строительству, возникает проблема с выбором строительных материалов. Современный рынок предлагает множество вариантов, каждый обладает как преимуществами, так и ограничениями. Сложность выбора заключается в необходимости учёта технических характеристик и экономических факторов, например, стоимость материалов, сроки строительства и эксплуатационные свойства зданий.

На сегодняшний день существует множество материалов, применяемых при малоэтажном строительстве, их разделяют на несколько категорий:

- мелкоштучные материалы (кирпич, газобетонные и пенобетонные блоки, шлакоблоки и т. п.);
- дерево и его производные;
- монолитные железобетонные (съемная и несъемная опалубка);
- каркасные (стальные и деревянные);
- панельные;
- комбинированные (объединяющие 2 и более вышеуказанных
- категорий);
- инновационные (3D-печать, композитные материалы, роботизация, «сухое» строительство).

С целью определения наиболее востребованной технологии, рассмотрим статистику малоэтажного строительства в Иркутской области исходя из материала стен (рис.2)

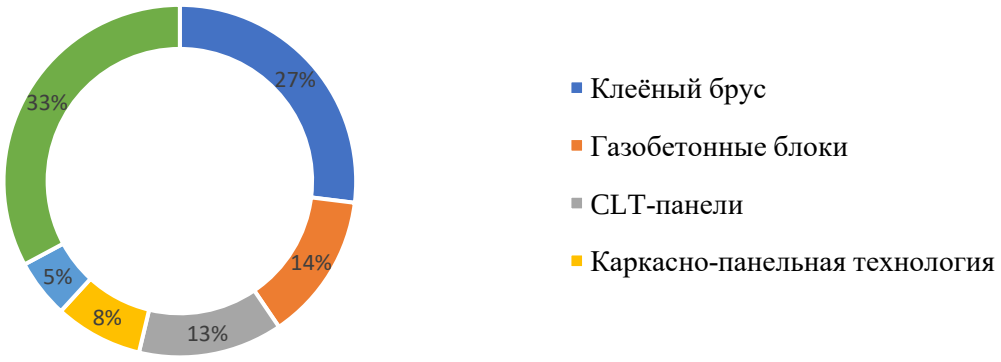


Рис. 2. Статистика по материалам стен в Иркутской области 2024 г. [3]

На территории Иркутской области клеёный брус является наиболее популярным материалом, его доля строительства составляет 27%. Газобетонные блоки занимают второе место с 14%. CLT-панели 13% доля строительства. Каркасно-панельная технология 8% и железобетонные панели 5%. К альтернативным способам строительствам можно отнести срубовые конструкции, кирпич, пиленый брус, блоки из натурального камня и т.д.

данные материалы не пользуются большой популярность в Иркутской области и доля строительства каждого материала не более 1%.

На основе анализируемых показателей, можно сделать вывод, что предпочтение отдаётся традиционным строительным материалам, но наблюдается интерес и к новым современным технологиям. В Иркутской области имеется 8 производителей клеёного бруса и минимум 4 производителя газобетонных блоков. Поставка CLT-панелей осуществляется из ближайших производств это Вологодская область или республика Карелия. Производством материалов для каркасно-панельной технологии занимаются 8 компаний, серди которых “Сава Сервис” (Братск/Иркутск),“Лесстроймаркет” (Иркутск) и “Гранд Фасад” (Иркутск).

В области по производству железобетонных панелей наиболее востребованные производители — это ООО “Сибавиастрой” (г. Иркутск), ООО “Ангара Профи” (г. Ангарск), ООО “ВостСибРегион” (г. Ангарск) и ООО “Новый Бетон” (г. Иркутск).

Проведем сравнение основных технологий по ключевым техническим и потребительским характеристикам, к которым можно отнести: стоимость основных материалов, срок строительства, потребность в машинах и механизмах, усадка при строительстве, долговременная безопасность эксплуатации объекта, необходимая транспортная доступность строительства, объём отделочных работ (Табл.2) [8-11].

Таблица 2. Сравнение современных строительных материалов.

Показатель строительства	**Строительный материал**				
	Клеёный брус	**Газобетонные блоки**	**CLT-панели**	**Каркасно-панельная технология**	**Ж/Б Панели**
Стоимость основных материалов	От 38 200 рублей за 1 куб.	От 5 000 рублей за 1 куб.	От 25 000 рублей за 1 куб.	От 30 000 рублей за 1 $м^2$	От 5 000 рублей за 1 $м^2$
Срок строительства	3-4 месяца	4-6 месяцев	2-3 месяца	1-3 месяца	3-4 месяца
Потребность в машинах и механизмах	1 кран	1 кран	1 кран	1 кран 1 погрузчик	1 кран 1 погрузчик манипулятор
Усадка при строительстве	Не значительная усадка	Не значительная усадка	Практически отсутствует	Практически отсутствует	Нет усадки
Долговременная безопасность эксплуатации объекта	50-100 лет	Около 50 лет	Более 50 лет	От 40 до 60 лет	Может превышать 100 лет
Необходимая транспортная доступность строительства	Высокая доступность	Хорошая доступность	Высокая доступность	Не критично	Высокая доступность
Объём отделочных работ	Низкий	Большой	Средний	Большой	Низкий

Проведём более подробное описание анализируемых технических и потребительских характеристик.

1. Стоимость основных материалов:

Наиболее экономичным вариантом являются газобетонные блоки (от 5 000 руб./м³), клеёный брус и CLT-панели можно отнести к категории дорогостоящих материалов. Ж/б панели, не являются самым дешёвым вариантом, но имеют оптимальное соотношение цены и качества. Их стоимость компенсируется долговечностью и минимальными затратами на отделку.

2. Срок строительства:

Каркасно-панельная технология (1–3 месяца) имеет наименьшие сроки возведения, что позволяет быстро вводить объект в эксплуатацию. Ж/б панели позволяют возводить здания за 3-4 месяца, что быстрее, чем строительство из клеёного бруса или газобетонных блоков.

3. Потребность в машинах и механизмах:

Все технологии требуют использования крана, но каркасно-панельная технология и ж/б панели так же нуждаются в погрузчике, что усложняет логистику, но их монтаж происходит быстрее и проще по сравнению с другими материалами, что снижает затраты на логистику и строительные работы.

4. Усадка при строительстве:

CLT-панели, каркасно-панельная технология и панели практически не имеют усадки, а у ж/б панелей усадка полностью отсутствует, что сокращает сроки отделки.

5. Долговременная безопасность эксплуатации:

Железобетонные панели лидируют по долговечности (срок службы превышает 100 лет), тогда клеёный брус и газобетонные блоки уступают. Это делает ж/б панели наиболее надёжным строительным материалом для строительства в условиях климата Иркутской области.

6. Транспортная доступность:

Необходимая транспортная доступность обусловлена возможностью комфортной транспортной доставки материала, в случае с клеёным брусом, CLT-панелями и ж/б панелями, необходима большая транспортная проходимость, так данные материалы доставляются большими партия и машинами с высокой возможностью загрузки, газобетонные блоки и каркасно-панельная технология менее требовательны.

7. Объём отделочных работ:

Объем отделочных работ материалов также обусловлен необходимостью внутренней и внешней отделки материала. Для клеёного бруса требуется шлифовка, защитное покрытие, декоративная отделка и т.д. Железобетонные панели изготавливаются на заводе, их преимущество в том, что, есть возможность сделать стену с утеплителем и готово поверхностью, из-за чего не будет требоваться дополнительная обработка, утепление и

выравнивание, а газобетонные блоки и каркасно-панельная технология предполагают значительные затраты на финишные работы.

Выводы

Из проведенного анализа и сравнения преобладающих строительных материалов железобетонные панели наиболее подходящий материалом для малоэтажного строительства в Иркутской области. Они сочетают высокую долговечность, минимальные сроки строительства и низкие затраты на отделку. Так же производство панелей в регионе делает их доступными для строительства.

Для дальнейшего развития рынка железобетонных панелей при строительстве малоэтажного жилья в Иркутской области целесообразно:

1. Увеличить производственные мощности местных заводов, это позволит снизить стоимость материала и сделать его более доступным для потребителей.
2. Развивать транспортную инфраструктуру, это упростит доставку панелей в отдалённые районы области.
3. Информационные кампании для повышения осведомлённости населения о преимуществах ж/б панелей, особенно в плане долговечности и энергоэффективности.
4. Стимулировать государственную поддержку через субсидии и льготные кредиты для строительства домов из ж/б панелей, что позволит сделать этот материал ещё более привлекательным для застройщиков.

Можно сделать вывод что, железобетонные панели соответствуют климатическим и экономическим условиям Иркутской области, а также и имеют значительный потенциал для дальнейшего развития в регионе.

Список использованной литературы

1. Султанов А. А., Морозова Н. И. Развитие рынка индивидуального жилищного строительства: российские и мировые тренды // Экономика и управление: проблемы, решения. 2024. № 4. Т. 3. С. 55–61. https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2024.04.03.007.
2. Синякова Е. В. Инновационный сценарий развития рынка индивидуального жилищного строительства / Е. В. Синякова // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2015. – № 1-2(61). – С. 229-233. – EDN TOLBNV.
3. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Иркутской области. Отчёт за 2024–2025 гг. URL: https://38.rosstat.gov.ru/folder/161072/document/253746.
4. Годовой отчет о ходе реализации комплексной государственной программы Российской Федерации «Строительство» за 2024 год. URL: https://www.minstroyrf.ru/docs/420793.

5. Петрова З. К. Энергоэффективные технологии в малоэтажном строительстве / З. К. Петрова // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 7. – С. 70-75. – EDN SHVQBL.

6. Курицына А. М. Обзор экологических строительных материалов, применяемых в Восточной Сибири / А. М. Курицына, А. А. Шалыгина // Проблемы экономики и управления строительством в условиях экологически ориентированного развития: Материалы IX on-line Международной научно-практической конференции, Братск, 28–29 апреля 2022 года / Под научной редакцией Л.А. Каверзиной, И.П. Нужиной, С.А. Астафьева. – Братск: Братский государственный университет, 2022. – С. 314-321. – EDN BMLSHE.

7. Родевич В. В. Совершенствование панельного малоэтажного строительства в условиях Сибирского региона / В. В. Родевич, Е. В. Родевич // Инвестиции, градостроительство, технологии как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения: Материалы XIV Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Томск, 12–14 марта 2024 года. – Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. – С. 445-453. – EDN JFFQKS.

8. ГОСТ 31310-2016 "Панели стеновые железобетонные для жилых и общественных зданий. Технические условия".

9. СП 50.13330.2012 "Тепловая защита зданий" (актуализированная редакция СНиП 23-02-2003).

10. ГОСТ 33114-2014 "Конструкции деревянные клееные несущие. Технические условия".

11. СП 31-105-2002 "Проектирование и строительство энергоэффективных одноквартирных жилых домов с деревянным каркасом".

УДК 614.8: 699.822: 69.07: 69.034.3

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ПО СНИЖЕНИЮ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ НАВОДНЕНИЙ НА СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Белаш Татьяна Александровна [1], д.т.н., профессор кафедры строительных сооружений, конструкций и материалов, **Богомазов Антон Сергеевич** [2], аспирант кафедры строительных сооружений, конструкций и материалов

Акционерное общество, научно-исследовательский центр «Строительство» (г. Москва, 2-я Институтская улица, д. 6, 109428, Российская Федерация), [1] belashta@mail.ru, [2] hondadream@mail.ru

Аннотация. Введение. Наводнения представляют собой одно из наиболее опасных и крайне распространенных стихийных бедствий, которым подвержено человечество. В настоящее время они занимают лидирующее место по числу чрезвычайных ситуаций нанося урон жилым и промышленным объектам.
Цель. Анализ существующих методов, направленных на повышение прочности и устойчивости зданий и сооружений во время наводнений.
Материалы и методы. В процессе анализа рассмотрены характерные повреждения зданий, а также современные инженерные решения по защите строительных конструкций от наводнений.
Результаты. Проведенный при выполнении данной работы анализ показывает возможность применения традиционных и инновационных инженерных решений.
Выводы. Несмотря на большой выбор современных инженерных решений их внедрение сдерживается сложностью реализации и существенными затратами. Наиболее целесообразным направлением защиты строительных конструкций является применение эффективных гидроизоляционных материалов. Тщательное устройство гидроизоляции и применение других устройств требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований для адаптации и оптимизации в условиях массового применения.
Ключевые слова: наводнение; паводки; строительные конструкции; решения по снижению влияния наводнений

ANALYSIS OF DESIGN SOLUTIONS TO REDUCE THE NEGATIVE IMPACT OF FLOODS ON BUILDING STRUCTURES AND STRUCTURES

Belash Tatyana Aleksandrovna [1]**,** D.Sc., Prof. of the Department of Building Structures, Constructions and Materials, **Bogomazov Anton**

Sergeevich [2]**,** PhD student of the Department of Building Structures, Constructions and Materials

JSC Research Center of Construction (Moscow, 2-ya Institutskaya Street, Bldg. 6, 109456, Russian Federation), [1] belashta@mail.ru, [2] hondadream@mail.ru

Abstract. Introduction. Floods are the most dangerous and extremely widespread natural disaster to which humanity is exposed. Currently, they occupy a leading position in the number of emergencies, causing damage to residential and industrial facilities.
Aim. Analysis of the impact of floods on building structures. An overview of existing methods aimed at improving the stability of buildings and structures.
Materials and methods. In the course of the study, characteristic damage to buildings was identified and modern engineering solutions for the protection of building structures were considered.
Results. The analysis carried out during this work shows the effectiveness of using traditional and innovative engineering solutions.
Conclusions. Despite the wide range of modern engineering solutions, their implementation is hampered by the complexity of implementation and significant costs. The most appropriate direction for the protection of building structures is the use of waterproofing materials, which requires further theoretical and experimental research for adaptation and optimization in conditions of mass use.
Keywords: flood; floods; building structures; flood mitigation solutions

Введение

С древних времен люди считают наводнение одним из самых страшных стихийных бедствий. Наводнения как стихийные бедствия занимают одно из первых мест в мире по количеству вызванных чрезвычайных ситуаций. Как правило, последствия наводнений имеют государственные масштабы. Правительства стран, пострадавших в результате наводнений, реагируют на катастрофы после их происшествия, при этом вовлекая средства от программ для развития страны. С ростом социально-экономического и экологического ущербов, наносимых стихийными бедствиями, на первый план выходят проблемы обеспечения безопасности человека в районах, страдающих от наводнений [1].

Под наводнениями, как известно, понимают значительное затопление местности в результате подъема уровня воды в реке, озере или море, которое может быть вызвано различными причинами [2]. Эти стихийные бедствия занимают одно из первых мест по повторяемости, площади распространения и материальному ущербу. Среди наиболее сильных и разрушительных за последнее время были наводнения на территории европейской части России, на пример: Челябинской области, Оренбургской области, Башкирии, в районах Дальнего Востока, Красноярском крае, Якутии и во многих других регионах нашей страны.

Основные причины наводнений и характер воздействий на строительные конструкции

Основными причинами возникновения этой чрезвычайной ситуации является, как правило, весеннее половодье и паводки. Известно, что половодье на больших реках может длиться в течение нескольких месяцев, паводки – несколько дней. При этом наибольший ущерб может быть нанесен именно паводком, вследствие его скоротечности, большой силы энергии волны, которая за короткий срок наносит сокрушительный удар по строительным объектам. Последствия наводнения могут быть катастрофическими: вода затапливает дома, общественные здания, промышленные объекты, что может привести к гибели людей и нанести значительный экономический урон региону.

Непригодность зданий для жизни – весьма распространенная проблема, возникающая после воздействия наводнений на строительные конструкции. В частности, это касается деревянных зданий, разрушение которых в основном обусловлено несколькими факторами – недостаточная прочность фундамента (рис. 1), склонность древесины к гниению и образованию грибка [3]. Металлические конструкции, эксплуатируемые в условиях агрессивной среды, подвержены коррозии и разрушаются довольно быстро, даже при наличии специальных защитных покрытий и составов (рис. 2). Бетонные и железобетонные элементы зданий теряют свои прочностные характеристики под воздействием воды, что приводит к сокращению срока службы сооружений (рис. 3) [4].



Рис. 1. Разрушение зданий из дерева



Рис. 2. Коррозия стальных конструкций



Рис. 3. Повреждение бетонных конструкций

Можно выделить основные типичные повреждения, которые были найдены в результате обследования зданий, пострадавших в результате наводнений [5, 6]:

1. Набухание грунта, то есть его увеличение в объеме приводит к деформации здания или к полному разрушению.
2. Подмыв фундамента приводит к частичной просадке здания, образованию трещин в несущих конструкциях и на фасадах, перекосу оконных и дверных проемов.
3. Намокание стен способствует образованию трещин на фасадах, потере теплотехнических свойств ограждающей конструкции, образование грибка.
4. Разрушение зданий и строительных конструкций под действием силы водяного потока. Быстрое нарастание уровня воды и скорости течения создаёт давление, при котором стены и фундаменты зданий не выдерживают нагрузки.

Существующие инженерные решения по защите строительных конструкций от наводнений

Уменьшение влияния наводнений может осуществляться различными способами, к которым относятся [7–9]:

1. Проведение подготовительных мероприятий.
2. Укрепление дамб, мостов, плотин.
3. Обваловка ответственных сооружений, наведение переправ.
4. Определение маршрутов эвакуации.
5. Проверка готовности аварийно-технических средств.

В настоящее время в практике проектирования объектов различного назначения появилось достаточно много инженерных решений и предложений по повышению сохранности зданий и сооружений, попадающих в опасную зону чрезвычайной ситуации, анализ некоторых из них рассмотрен далее.

Среди разнообразных предложений следует выделить группу решений, в которой главное место занимают плавающие платформы.

Так, в решении, представленном на рис. 4 [10], в основании кессона располагаются ребра жесткости, передающие нагрузку от давления воды на сваи подобно балкам, которые несут нагрузку на перекрытия. Пустоты между ребрами используются для прокладки коммуникаций.

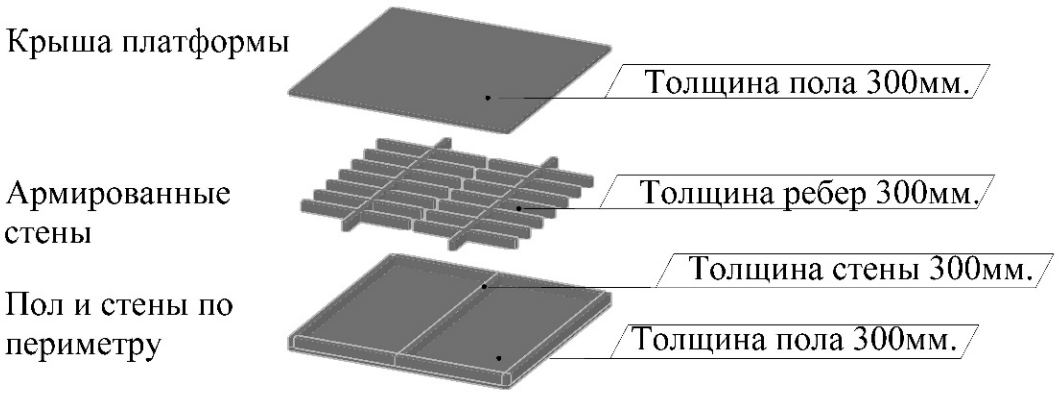


Рис. 4. Плавающая платформа

На рис. 5 представлена платформа, установленная на сваях в уровне поверхности земли. В условиях подтопления платформа поднимается выше этого уровня. Сваи обеспечивают равномерное и стабильное поднятие платформы независимо от характера течения воды и волновых нагрузок.

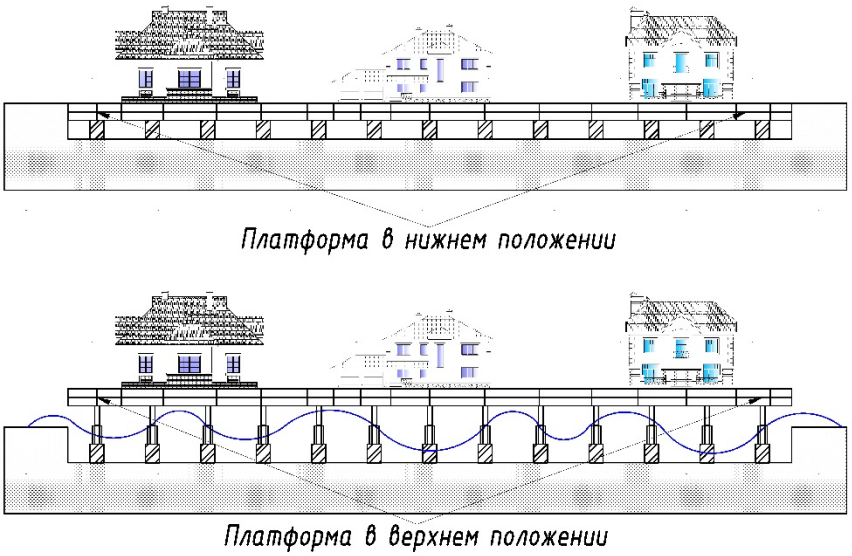


Рис. 5. Принцип действия плавающей платформы

Наземный понтонный подъем здания

Понтонный подъем здания включает в себя пластиковые понтонные короба, состоящие из пластиковых стенок и ребер жесткости, прикрепленных на металлических балках, являющихся ростверками здания и передающие нагрузку на винтовые сваи, состоящие из внутреннего и внешнего ствола. В случае затопления и повышения уровня воды происходит затопление внешнего объема свободного котлована. Когда уровень воды достигает запроектированного значения высоты понтонных пластиковых коробов, система наземного понтонного подъема приводится в действие. Выталкивающая сила воды равна весу всего здания. Происходит подъем свай конструкции здания путем выдвижения в вертикальном положении

внутреннего ствола сваи, вдоль шахты внешнего ствола сваи, до определенного упора, который может быть задан расчетно, с требуемыми параметрами допустимой высоты в метрах (рис. 6) [11].

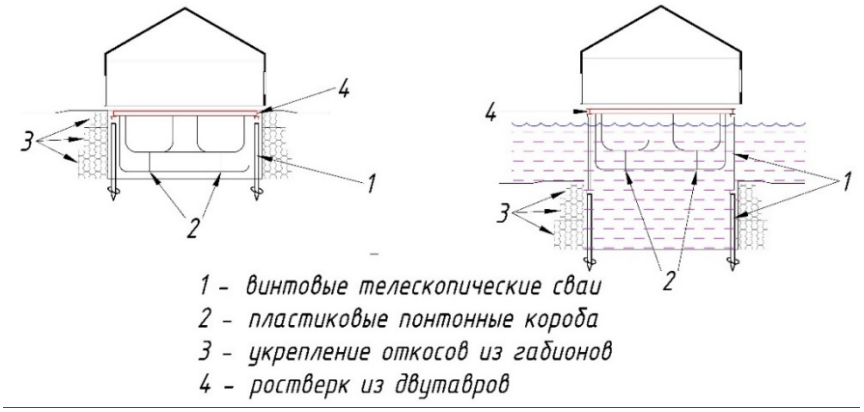


Рис. 6. Наземный понтонный подъем здания

Гидроизоляция ограждающих подземных конструкций

В другой группе конструктивных предложений по защите от наводнений зданий и сооружений основное внимание уделяется вопросам гидроизоляции ограждающих подземных конструкций [12]. Одним из решений является применение пристенного дренажа с интегрированной фильтрующей оболочкой. Оболочка, выполненная из полимерного материала, вертикально уложена на наружную поверхность стены с образованием каналов, отводящих воду из грунтовой засыпки в обсыпку дренажной трубы, соединенной с отводящим коллектором. Фильтрующая оболочка представляет собой конструкцию, включающую геосетку и фильтрующий нетканый материал, например, геотекстиль. Этот материал фиксируется со стороны грунтовой засыпки. Все это позволяет обеспечить высокий уровень пристенной гидроизоляции, защиту конструкции здания во время наводнения, способствует долговечности и устойчивости конструкций к неблагоприятным природным факторам (рис. 7).

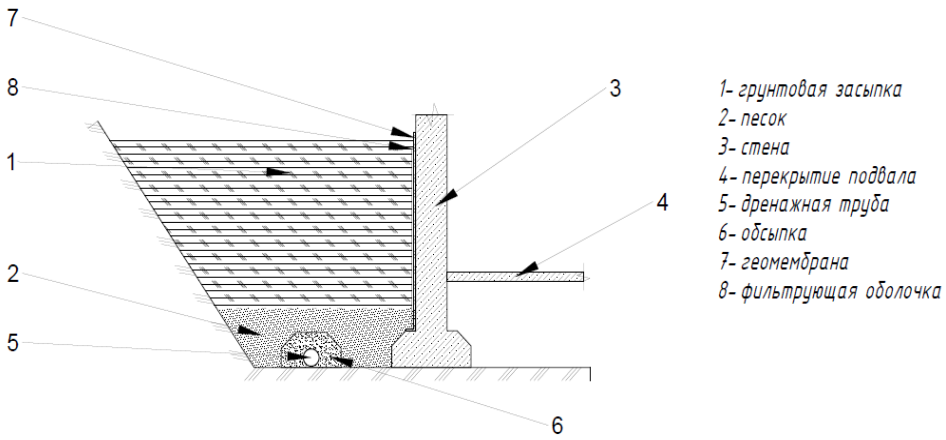


Рис. 7. Гидроизоляция ограждающих подземных конструкций

Защитные архитектурные решения

Помимо конструктивных защитных элементов могут также предусматриваться специальные внешние архитектурные формы зданий и сооружений в виде обтекаемой железобетонной оболочки эллипсовидного типа, представленной на рис. 8 [13].

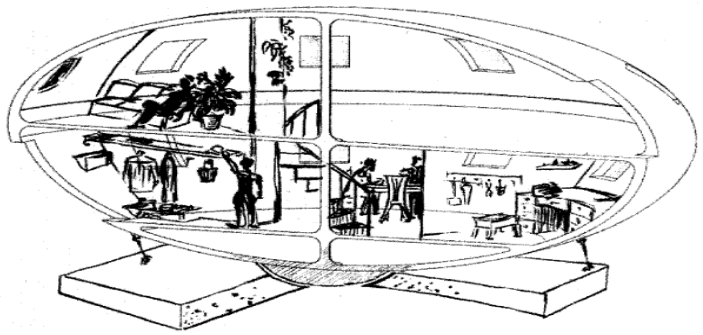


Рис. 8. Обтекаемая железобетонная оболочка эллипсовидного типа

Выводы

Краткий обзор различных методов защиты зданий и сооружений от подтоплений и наводнений свидетельствует о том, что в настоящее время не многие предложения могут быть действительно реализованы. Это связано со сложностью их конструктивного исполнения и высокой стоимостью. Среди предлагаемых решений наиболее рациональным следует признать создание эффективной гидроизоляции на ограждающих конструкциях подземной части зданий с использованием современных материалов, обладающих высокими гидроизоляционными свойствами. Однако для внедрения их в практику строительства требуется проведение дальнейших расчетно-экспериментальных исследований.

Список использованной литературы

1. Авакян А. Б., Истомина М. Н. Наводнения как глобальная проблема // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2013. № 1. С. 180-193.

2. Симонов В.В., Осадчий О.В. Природа возникновения наводнений, затоплений и характеристика поражающих факторов // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2014. № 1. С. 9-19.

3. Бусин М. В., Варфоломеев А. Ю., Попов А. Н. Влияние паводка на состояние строительных объектов Архангельска // Арктика и Север. 2011. № 3. С. 1-12.

4. Ветров С. Н., Яковлев С. В. Специфика обследования состояния железобетонных конструкций в условиях агрессивного воздействия воды // Magazine of Civil Engineering. 2010. № 7. С. 35-40.

5. Арленинов П. Д. Типичные повреждения подтопленных жилых домов при наводнении в Амурской области // Жилищное строительство. 2013. № 12. С. 19-22.

6. Павлушкина Ю. Е., Барашкова П. С., Шавва А. А. Негативные последствия наводнений. Влияние наводнений на существующую застройку // Наука без границ. 2017. № 5. С. 182-185.

7. Ануфриев Ф. Е., Кривенко Н. Н. Наводнения и методы их предупреждения // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2016. № 1-2. С. 7-8.

8. Лебедева И. П. Значение водохранилищ в комплексном управлении наводнениями в начале 21 века // Природообустройство. 2019. № 1. С. 19-26.

9. Юлдашева К. А. Борьба с паводками: обзор мирового опыта // Информационный сборник НИЦ МКВК. 2010. С. 6-67.

10. Еремеева М. А., Иванова Ж. В, Уздин А. М. Оценка эффективности защиты от наводнений в зонах возможного подтопления путем строительства зданий на понтонах // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2024. № 6. С. 178-190. 10.37153/2618-9283-2024-6-178-190.

11. Пат. 177 009 Российская Федерация, МПК E02D 27/06. Фундамент здания для наземного понтонного подъёма здания при наводнениях [Текст] / Кузьминых А. В. / заявл. 2017-05-20; опубл. 06.02.2018.

12. Пат. 2 462 560 Российская Федерация, МПК E02D 31/02. Подземная часть бетонной стены с пристенным дренажом [Текст] / Ягин В. П., Генкин С. А., Чупин Г. А., Мордвинов А. В., Путивский С. А. / заявл. 2011-05-20; опубл. 27.09.2011.

13. Пат. 49 071 Российская Федерация, МПК E04H 9/00. Жилой дом "Линза" [Текст] Багдади Ш.З. / заявл. 2010-02-10; опубл. 10.11.2005.

УДК 69.07
УДК 699.8

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КОНСТРУКЦИИ ПОКРЫТИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Белаш Татьяна Александровна[1], д. т. н., профессор кафедры строительных сооружений, конструкций и материалов;
Чудаков Алексей Андреевич[2], аспирант кафедры архитектурно-строительного проектирования

[1]АО «НИЦ» Строительство» (г. Москва, 2-я Институтская ул., д.6, 109428, Российская Федерация), belashta@mail.ru
[2]Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9, 190031, Российская Федерация), chudakov@agiogk.ru

Аннотация. Глобальное изменение климата, особенно в последние годы, влечет за собой возникновение все большего количества природных чрезвычайных ситуаций. Воздействие землетрясений, ураганных ветров и торнадо приводит не только к людским потерям, но и к разрушениям зданий и сооружений. Это в свою очередь вызывает увеличение потерь среди населения, а также приводит к серьезным экономическим трудностям. Сейчас также актуальна проблема возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера, среди которых необходимо особенно выделить попадания беспилотных летательных аппаратов в строительные объекты. Данное воздействие крайне опасно как для людей, находящихся внутри зданий и рядом с местом попадания, так и для конструкций здания, так как приводит к их локальному разрушению. Данная работа посвящена анализу влияния природных и техногенных воздействий на конструкции покрытий зданий и сооружений.
Ключевые слова: покрытие здания, землетрясение, ураган, смерч, разрушения.

INFLUENCE OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC IMPACTS ON ROOF CONSTRUCTIONS OF BUILDINGS AND STRUCTURES

Belash Tatiana Alexandrovna, D.Sc., Professor of the Department of Building Structures, Constructions and Materials;
Chudakov Alexey Andreevich, postgraduate student, Department of Architectural and Construction Designing

[1]AO « NITZ» Stroitel’stvo» (Moscow, 2nd Institutskaya St., 6, 109428, Russian Federation), belashta@mail.ru

[2]Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Saint Petersburg, Moskovsky pr., 9, 190031, Russian Federation), chudakov@agiogk.ru

Abstract. Global climate change, especially in recent years, is causing an increasing number of natural emergencies. The impact of earthquakes, hurricane winds and tornadoes cause not only loss of life but also destruction of buildings and structures. This causes increased losses among the population as well as serious economic difficulties. The problem of emergencies of man-made nature is also relevant now, among which it is necessary to emphasise the impact of unmanned aerial vehicles on construction projects. This impact is extremely dangerous both for people inside the buildings and near the point of impact, and for the building structures, as it leads to their local destruction. This work is devoted to the analysis of the influence of natural and man-made impacts on the on the roof structures of buildings and constructions.
Keywords: building roof, earthquake, hurricane, tornado, destruction.

Введение

Ежегодно, из-за природных и техногенных воздействий зданиям и сооружениям наносится ущерб, приводящий к экономическим и людским потерям. По данным МЧС за 2023 год материальный ущерб от природных воздействий составил 61,43 миллиарда рублей, от техногенных воздействий – 2,89 миллиона рублей [1]. В 2022 году общий материальный ущерб составил 7,83 миллиарда рублей, в 2021 – 47,87 миллиарда рублей, в 2020 году – 163,78 миллиарда рублей, в 2019 году – 20,51 миллиарда рублей.

Наблюдается увеличение масштабов последствий от чрезвычайных ситуаций согласно мировой статистике. Согласно ежегодным отчетам SwissRe [2] экономические потери от природных и техногенных чрезвычайных ситуаций за 2024 год составили 320 миллиардов долларов США, за 2023 год – 302 миллиарда, за 2022 – 268 миллиарда, за 2021 – 303 миллиарда, 2020 – 215 миллиарда, 2019 – 149 миллиарда (см. табл. 1).

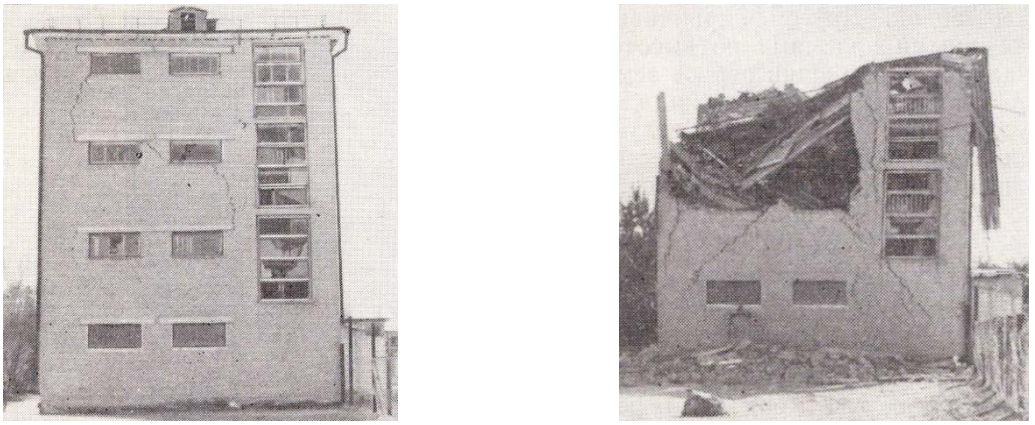
Таблица 1. Экономические потери в мире за 2024 и 2023 года в млрд. долларов США

	2024 г.	2023 г.	Изменение за год	Среднее значение за последние 10 лет
Полные экономические потери (млрд. долларов США)	320	302	6%	254
Потери от природных воздействий	310	291	6%	241
Потери от техногенных воздействий	10	11	-8%	13

Практически каждый год экономические потери увеличиваются. В связи с этим крайне важно обеспечить защиту зданий и сооружений от природных и техногенных воздействий для того, чтобы гарантировать безопасность населения, снизить ущерб, получаемый зданиями и сооружениями.

Повреждения конструкций покрытий зданий и сооружений

При возникновении природных или техногенных чрезвычайных происшествий может сложиться ситуация, при которой происходят либо совместные воздействия, либо одно разрушительное воздействие следует за другим, тем самым, усугубляя негативное их влияние на состояние строительных объектов. У каждого воздействия своя природа происхождения и воздействия на строительные конструкции зданий и сооружений. Среди разрушительных, наиболее опасными природными воздействиями являются землетрясения. Природа их возникновения связана с глубинными процессами, происходящими внутри Земли и связана с высвобождением потенциальной энергии, сопровождающимся сильными колебаниями земной поверхности и передающимся непосредственно зданиям и сооружениям. Степень и характер повреждений строительных конструкций, попадающих в зону этого влияния, зависит от многих факторов. Одним из уязвимых мест в общей строительной системе здания, сооружения являются конструкции покрытия, которые в процессе сейсмических колебаний принимают на себя завершающую силу воздействия. На рис. 1 приведены примеры повреждения школьного здания после землетрясения в пос. Газли в 1976 году. При воздействии 9 апреля 1976 года (рис. 1а) и после повторных сильных толчков 17 мая 1976 года (рис. 1б) [3]. В целом здание школы обрушилось после разрушения поврежденных ранее конструкций покрытия.



а) б)

Рис. 1. Повреждения здания школы в пос. Газли: а) после первых толчков [3]; б) после повторных сильных толчков [3]

Другими примерами разрушений конструкций покрытия зданий служат мечеть Хабиб-и-Наджар, крыша которой была разрушена после землетрясения в Турции от 6 февраля 2023 года (рис. 2а), а также одно из зданий в Мехико,

крыша которого была разрушена землетрясением, произошедшим в 19 сентября 1985 года (рис. 2б). Примеров повреждений после землетрясений достаточно много, они представлены в различной научной литературе.



а)



б)

Рис. 2. Разрушения конструкций покрытия зданий после землетрясений: а) разрушенная мечеть Хабиб-и-Наджар в Турции; б) разрушенное здание в Мехико;

Следует заметить, что районы с высокой сейсмической активностью очень часто попадают в зоны и других природных воздействий, таких как ураганы, смерчи и т.п. Как известно, ураган – «это ветер разрушительной силы и значительной продолжительности, скорость которого превышает 32,7 м/с». При скорости ветра от 35 м/с у зданий начинает срывать крыши (рис.3), а при превышении скорости 50 м/с, возможно разрушение вертикальных стен и каркасов городских домов [4]. Так, в 2016 году в городе Дудинка Красноярского края у одного из домов штормовым ветром сорвало крышу (рис. 3а). В 2025 году бушующие ураганы снова срывали крыши домов в Красноярском крае (рис. 3б). Данная проблема характерна и для других регионов страны, например для города Магадан (рис. 3в).



а)



б)

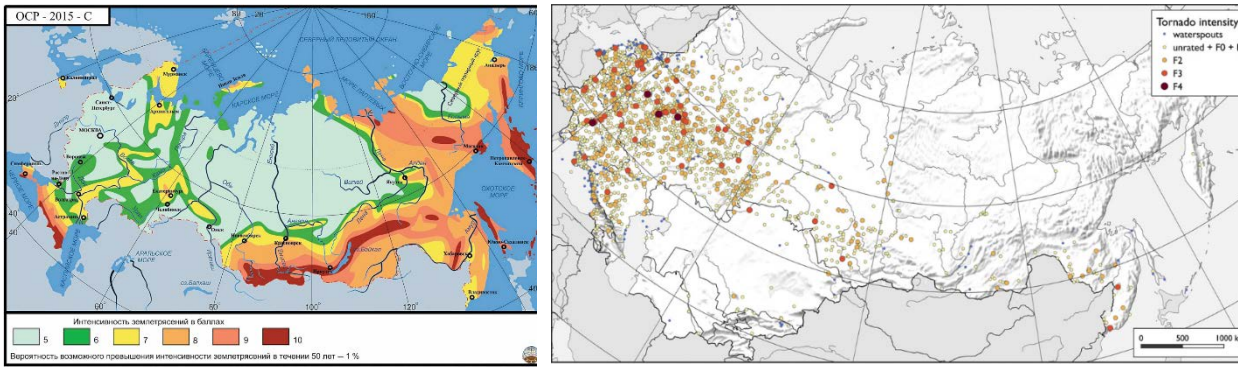


в)

Рис. 3. Срыв крыш с домов в результате воздействия ураганов: а) Красноярский край, 2016 год; б) Красноярский край, 2025 год; в) г. Магадан, 2021 год

Такая же опасность возникает при смерчах. Смерч – «это сильный маломасштабный атмосферный вихрь диаметром до 1000 м, в котором воздух вращается в виде воронки со скоростью 50 - 100 м/с и более, обладающий большой разрушительной силой».

В Российской Федерации за период с 2009 по 2018 год, ежегодно фиксируется около 100 смерчей [5]. В случае, если конструкции покрытия были повреждены после разрушительных ураганов или смерчей и их не удалось быстро восстановить, то при внезапном возникновении сейсмических колебаний здание или сооружение может получить серьезные повреждения, которые могут являться причиной окончательного их обрушения. Некоторые регионы Российской Федерации, находящиеся в сейсмоопасных районах также подвержены частому образованию смерчей (рис. 4).



а) б)

Рис. 4. Карты с обозначением местностей, подверженных природным катаклизмам: а) карта сейсмического районирования России; б) карта ураганов в северной Евразии [5]; в) наложение карт сейсмического районирования РФ и карты возникновения смерчей на территории Северной Евразии

В настоящее время к природным воздействиям на покрытия строительных объектов накладываются и техногенные, например, в виде ударов БПЛА, нарушающие целостность конструкции и приводящие к серьезным ремонтным работам (рис. 5). Так, во время атак дронами были повреждены крыши зданий в Казани (рис 5а), Московской области (рис. 5б) и Москве (рис. 5в) и многих других городах. Под угрозой преимущественно находятся регионы в европейской части Российской Федерации, такие как Ростовская область, на территории которой после атаки дронами 9 апреля 2025 года были повреждены крыши двух домов, а также Автономная Республика Крым, Волгоградская область, Астраханская область и другие.







а) б) в)

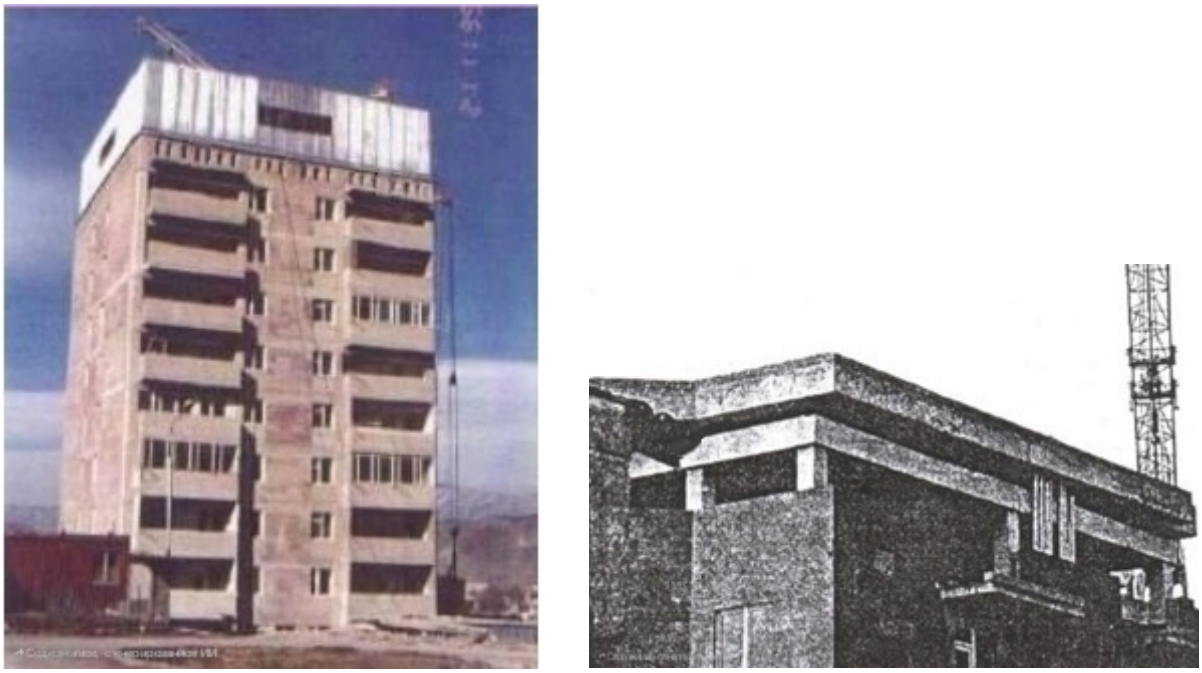
Рис. 5. Повреждения покрытий здания от попаданий БПЛА: а) г. Казань, 21 декабря 2024 года; б) г. Видное, 11 марта 2025 года; в) г. Москва, 11 марта 2025 года

Все вышесказанное свидетельствует, что сильные природные и техногенные воздействия могут являться причиной серьезных проишествий и нанести не только материальный ущерб, но и привести к многочисленным человеческим жертвам.

Для предотвращения этих последствий, требуется проведение комплексных исследований, уделяя при этом, особое внимание конструкциям покрытий зданий и сооружений. Такие исследования проводятся на кафедре «Архитектурно-строительное проектирование» в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I.

В качестве варианта комплексной защиты покрытия предлагается рассмотреть использование дополнительного верхнего «гибкого этажа», который применяется в сейсмических районах в качестве средства сейсмозащиты в виде динамического гасителя колебаний [6,7,8]. Примеры реализации дополнительного верхнего «гибкого этажа» в сейсмически опасных районах показаны на рисунке 6. В конструкцию «гибкого верхнего этажа» могут быть введены дополнительные элементы, не только повышающие сопротивляемость покрытия здания при сейсмических колебаниях, но и увеличивающие сопротивляемость покрытия ураганным ветрам, а также воздействиям дронов.

Предварительные расчётные исследования предлагаемых решений при различных сценариях воздействия позволяют рассматривать эти предложения как возможные варианты комплексной зашиты покрытия.



а) б)

Рис. 6. Варианты устройства «гибких верхних этажей» в Армении [6]: а) г. Ванадзор, девятиэтажное здание; б) г. Ереван, двенадцатиэтажное здание

Вывод

При землетрясениях конструкции покрытия, принимают на себя завершающую силу воздействия, что приводит к их разрушению. Также, смерчи и ураганы при воздействии на строительные объекты зачастую вызывают разрушения конструкций покрытия. Попадания БПЛА в крыши зданий в свою очередь нарушают целостность конструкций и приводят к серьезным ремонтным работам.

Список используемой литературы:

1. Итоги деятельности МЧС России // МЧС России. – URL https://mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii (дата обращения 15.03.2025).

2. Hurricanes, severe thunderstorms and floods drive insured losses above USD 100 billion for 5th consecutive year, says Swiss Re Institut]. – URL https://www.swissre.com/press-release/Hurricanes-severe-thunderstorms-and-floods-drive-insured-losses-above-USD-100-billion-for-5th-consecutive-year-says-Swiss-Re-Institute/f8424512-e46b-4db7-a1b1-ad6034306352 (дата обращения 15.03.2025).

3. Поляков С. В. Последствия сильных землетрясений/ С. В. Поляков. – М.: Стройиздат, 1978. – 311 с.

4. Бирбраер А. Н. Экстремальные воздействия на сооружения / А. Н. Бирбраер, А. Ю. Роледер. – СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2009. – 594 с.

5. Chernokulsky, A., Kurgansky, M., Mokhov, I., Shikhov, A., Azhigov, I., Selezneva, E., Zakharchenko, D., Antonescu, B., Kühne, T. Tornadoes in Northern Eurasia: From the Middle Age to the Information Era. // Monthly Weather Review. 2020. №148(8). P. 3081-3110. DOI: 10.1175/MWR-D-19-0251.1.
6. Белаш Т.А. Использование эффекта «гибкого этажа» в зданиях жестких конструктивных систем // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2023. № 2. С.45–53
7. Белаш, Т. А. Нетрадиционные способы сейсмозащиты транспортных зданий и сооружений : монография / Т. А. Белаш. – М.: ФГБОУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспотре», 2017. — 175 с.
8. Хачиян Э.Е. Сейсмическое воздействие и прогноз поведения сооружений/ Э.Е. Хачиян – Ереван: «Гитутюн» НАН РА, 2015. – 555 с.

УДК 627.26

ОСОБЕННОСТИ СТРУИ ОТ ДВИЖИТЕЛЯ СУДНА ПРИ НАЛИЧИИ РУЛЕВОГО УСТРОЙСТВА

Беляев Николай Дмитриевич [1], к.т.н., доцент высшей школы гидротехнического и энергетического строительства, **Волкова Юлия Валерьевна** [2], к.т.н., доцент высшей школы гидротехнического и энергетического строительства, **Скворцова Ольга Станиславовна** [3], к.т.н., доцент высшей школы гидротехнического и энергетического строительства

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, 195251, Российская Федерация), [1] belyaev_nd@spbstu.ru, [2] volkova_yuv@spbstu.ru, [3] skvortsova_os@spbstu.ru

Аннотация. В статье обосновывается актуальность изучаемой проблемы и дается описание сооружений, подвергающихся опасности подмыва при воздействии судовой струи. Рассмотрены особенности струи, образованной движителем судна при наличии руля. Проанализирована доступная информация о влиянии конструкции рулевого устройства на образование струи от основных движителей судна, на распределение скоростей по длине такой струи и об ее итоговом размывающем воздействии на дно и основания гидротехнических сооружений. В частности, рассмотрены варианты стандартного размещения одиночного руля за винтом и двух рулей за винтами, показано каким образом на струю влияет поворот руля. Дано краткое описание процессов, протекающих при

этом в струе. Указывается, что в Российской Федерации имеется необходимость создания подробного нормативного документа по данной тематике.
Ключевые слова: гребной винт, струя, рулевое устройство, размыв, гидротехнические сооружения.

FEATURES OF THE JET FROM THE PROPULSION SYSTEM OF THE SHIP WITH RUDDER DEVICE

Belyaev Nikolay Dmitrievich[1], Ph.D., Ass. Prof. of the Higher School of Hydraulic and Power Engineering, **Volkova Yulia Valerevna**[2], Ph.D., Ass. Prof. of the Higher School of Hydraulic and Power Engineering, **Skvortsova Olga Stanislavovna**[3], Ph.D., Ass. Prof. of the Higher School of Hydraulic and Power Engineering

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St.Petersburg, Polytechnicheskaya, 29, 195251, Russian Federation), [1] belyaev_nd@spbstu.ru, [2] volkova_yuv@spbstu.ru, [3] skvortsova_os@spbstu.ru

Abstract. The article substantiates the relevance of the problem under study and provides a description of structures that are at risk of being washed away by jets frjm ship propeller. The features of the jet formed by the ship's propeller in the presence of a rudder are considered. Available information on the influence of the rudder device design on the formation of a jet from the main propellers of a vessel, on the velosity distribution along the length of such a jet and on its final scouring effect on the bottom and foundations of hydraulic structures is analyzed. In particular, the options for standard placement of a single rudder behind the propeller and two rudders behind the propellers are considered, and it is shown how the rudder rotation affects the jet. A brief description of the processes occurring in the jet is given. The need to create a detailed regulatory document on this topic in the Russian Federation is indicated.
Keywords: ship propeller, jet, rudder device, scour, hydraulic structures.

Введение

Актуальность рассматриваемой проблемы связана с ростом грузопотоков водного транспорта, что неизбежно приводит к увеличению размерений судов, мощности их основных двигателей, появлению новых конструктивных решений обустройства судовых рулей и винтов [1-3].

Одной из существенных опасностей для функционирования причалов являются размывы в непосредственной близости к основаниям определенных типов гидротехнических сооружений (ГТС). В рассматриваемом случае участки с размывами образуются в том числе и при вращении гребных винтов современных судов с большой осадкой (рис. 1) [4-8].

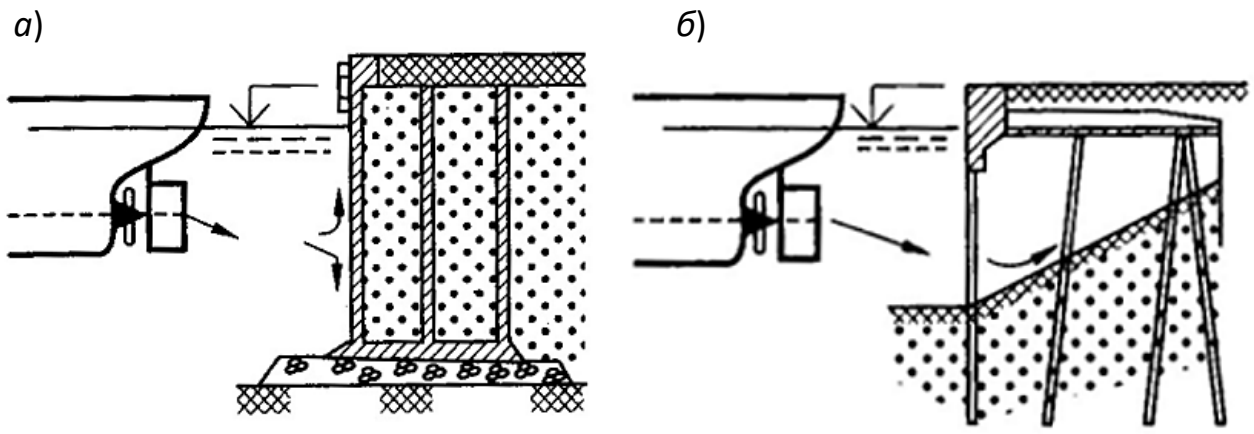


Рис. 1. Схема размывающего воздействия на причальные конструкции: *а* – вертикальные стенки гравитационного типа; *б* – сквозные конструкции свайного типа

Рассмотрение и анализ

В работе рассматриваются особенности образования и распространения движительной струи при наличии у судна рулевого устройства. Обычное размещение руля, показанное на рисунке 2, *а*, значительно изменяет струю, что особенно проявляется при стоянке или швартовке судна, когда скорость его движения весьма мала или равна нулю. На рисунке 3 показано, как при руле с нулевым углом поворота, происходит разделение потока на две струи, направленные в разные стороны.

На рисунке 4 представлен пример результатом физического моделирования распространения струи от гребного винта с одиночным рулем (*а*) и без рулевого устройства за винтом (*б*). Показанная на рисунке 4 разница в формировании струи может быть объяснена за счет учета закручивания струи с появлением тангенциальных составляющих скоростей. При использовании в указанном случае традиционной методики определения параметров затопленной струи с отсутствием вращения в итоге будет получен поток, объединенный из двух соосных струй, обтекающих руль судна.

Наличие вращения потока из-за работы гребного винта может объяснить появление части струи, направленной ко дну и представляющей особую опасность для ГТС [2].

а) *б*)



Рис. 2. Варианты рулевого устройства:
а – с одним рулем; *б* – с двумя рулями

а) *б*)

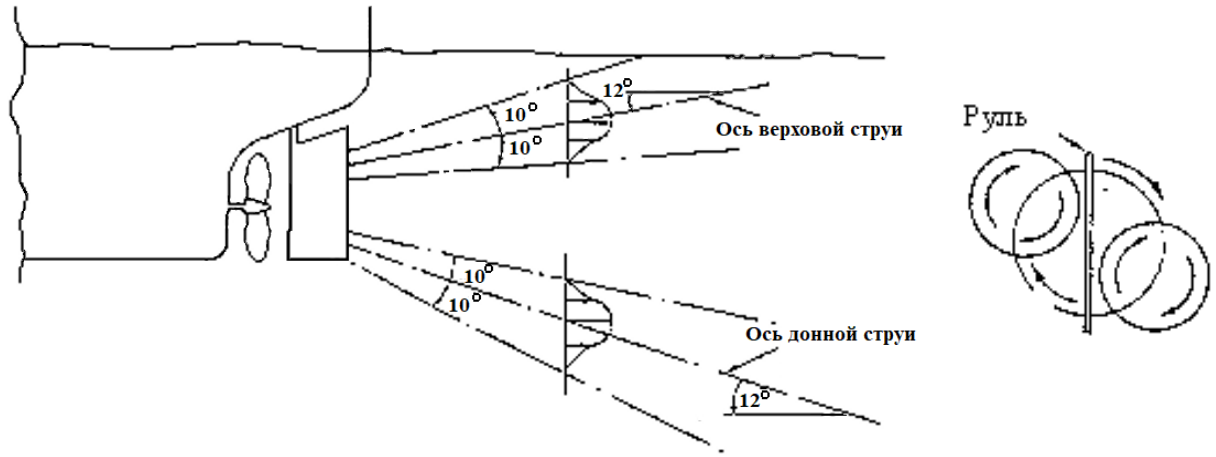


Рис. 3. Деление струи рулевым устройством на два потока:
а – вид сбоку; *б* – направления вращений

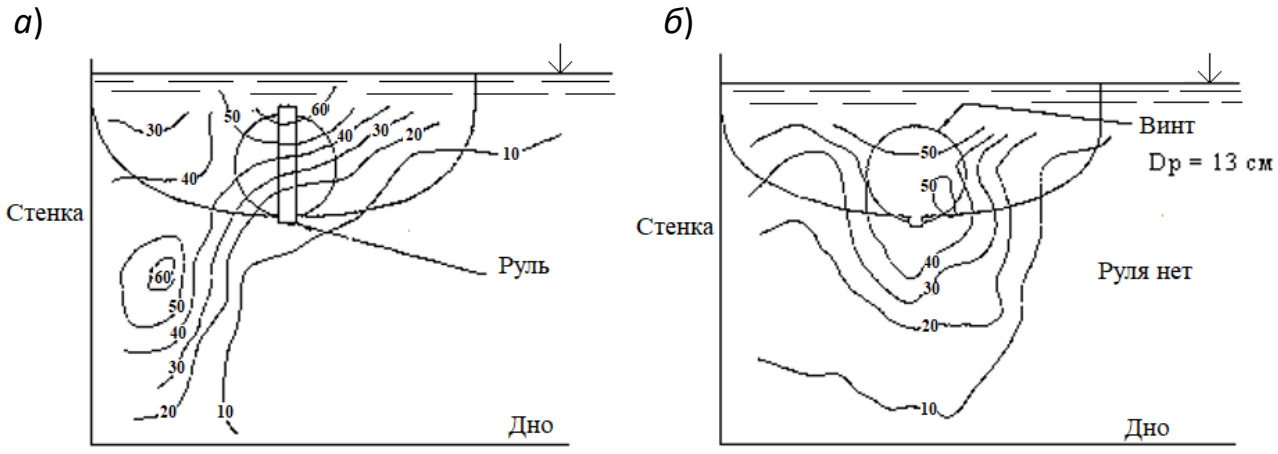


Рис. 4. Экспериментальные результаты определения скоростей в струе, см/с: *а* – от винта с рулем; *б* – от винта без руля

Необходимо отметить, что влияние рулевого устройства зависит в первую очередь от конструктивных решений и расстояния между осями вращения движителя и креплением руля. Размывающее воздействие струи от гребного винта и влияние на него рулевого устройства особенно заметно при отсутствии поступательного движения – при стоянке, швартовке или маневрировании судна [9].

Влияние поворота руля на процесс формирования струи от судового движителя представлено на рисунке 5. Наблюдения, проведенные в реальных условиях образования струи при вращении винта пришвартованного к причалу судна показали, что струя отклонялась на угол, меньший в два приблизительно раза угла поворота самого руля. Конструкция винторулевого устройства судна была традиционной с размещением на одной оси.

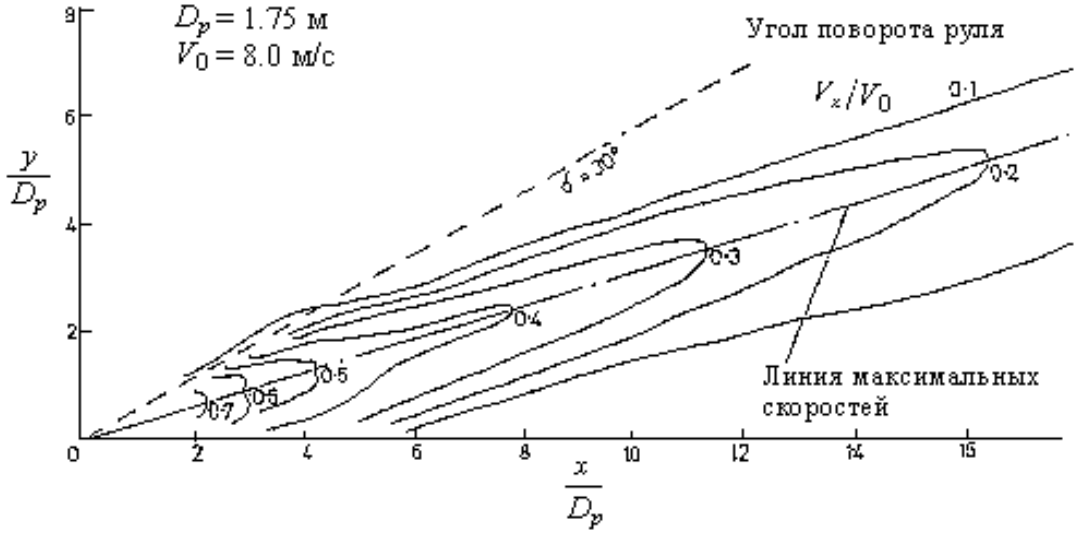


Рис. 5. Результаты натурного наблюдения за распространением движительной струи при повороте руля

Кроме представленных выше традиционных вариантов конструкций рулевых устройств и их размещения относительно движителя в последние годы появились суда с разнообразными решениями обустройства винторулевой группы. Есть суда с двумя рулями, размещенными за одним винтом или за двумя винтами, при несовпадении осей их расположения (см. рис. 1, *б*). Как показывают наблюдения за такими судами рулевое устройство будет также влиять на движительную струю, отклоняя ее часть в сторону, но это влияние будет меньшим, чем в ранее рассмотренных случаях (рис. 6).

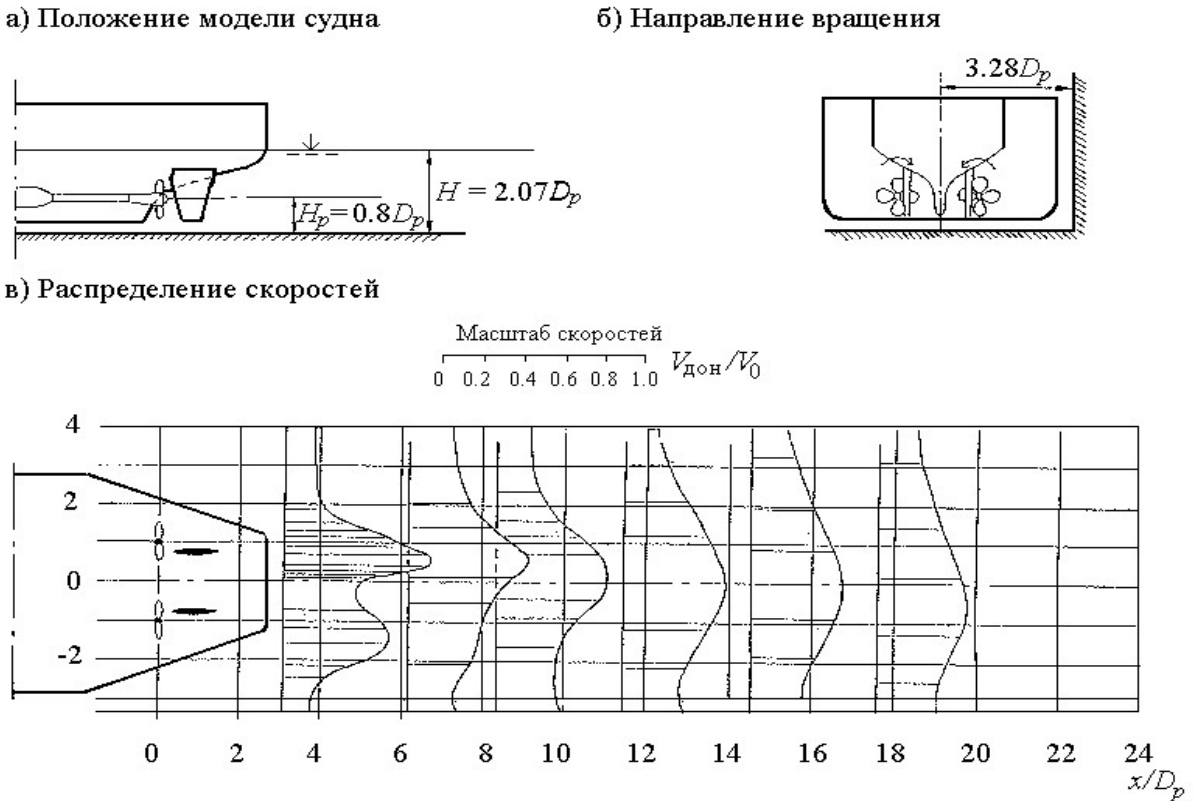


Рис. 6. Пример распределения скоростей в струе от судна с двумя винтами и двумя рулями [10]

Выводы

В РФ до последнего времени публикации и исследования по тематике, связанной с обоснованным выбором инженерных мероприятий по защите дна и оснований ГТС практически отсутствовали. Впервые рекомендации по определению параметров струи от судовых движителей были введены в СП 38.13330.2018 изменением N 1 от 16.01.2022 г. После введения указанного изменения в Своде правил появилась методика определения исходных параметров струи, ее формирования и результирующего воздействия на дно.

Данная методика не полна, в частности в ней не даются рекомендации по учету влияния конструктивных особенностей судовых устройств на движительную струю и ее размывающее действие. В связи с важностью учета размывающего действия струй от судовых движителей на основания ГТС необходима разработка отечественного нормативного документа с

рекомендациями, которые учитывают влияние указанных в данной статье особенностей.

Список использованной литературы

1. Альхименко А. И., Беляев Н. Д., Фомин Ю. Н. Безопасность морских гидротехнических сооружений. – СПб.: Издательство «Лань», 2003. – 288 с.

2. Беляев Н. Д. Инженерные методы предотвращения размыва дна от работы судовых движителей. Автореферат диссертации на соиск. степени канд. техн. наук. СПбГТУ, 1999 г., 16 с.

3. Беляев Н. Д., Климович В. И. Современное состояние проблемы защиты дна от размывов, вызванных работой судовых движителей // Гидротехническое строительство. 2019. № 2. С. 7-16.

4. Blaauw H. G. & Kaa van de E. J. Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw race of manoeuvring ships. 7th Int. Harbour Congress, Antwerp, 1978.

5. Verhey H. J. The stability of bottom and banks subjected to the velocities in the propeller jet behind ships. DHL Publication No 303, 1983.

6. Guidelines for protecting berthing structures from scour caused by ships. PIANC Report N° 180. Maritime Navigation Commission. PIANC, 2015.

7. Hawkswood M., Flierman M., De Haan R. et al. Propeller action and berth scour protection. PIANC – COPEDEC IX, Rio de Janeiro, Brasil. 2016.

8. Климович В. И., Яковлев Р. О. Экспериментальные исследования воздействия от винтов судна на защиту от размывов с помощью габионов // Гидротехническое строительство. 2024. № 3. С. 31-38.

9. Fuehrer M., Römisch K. & Engelke G. Criteria for dimensioning the bottom and slope protections and for applying the new methods of protecting navigation canals. Section I – Volume 1. PIANC’s 25th Int. Navigation Congress, Edinburgh. 1981.

10. Bergh H. The influence on harbours by the action of the jet behind a propeller. TRITA-VBI-104. Stockholm. 1981.

УДК 691.175.2

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЭТИЛЕНВИНИЛАЦЕТАТА СО СЛОИСТЫМИ И СФЕРИЧЕСКИМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

Булучевская Анастасия Дмитриевна, студент, **Беляева Наталья Олеговна**, студент, **Сухарева Ксения Валерьевна**, к.х.н., доцент, ведущий научный сотрудник базовой кафедры химии инновационных материалов и технологий

Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Высшая инженерная школа «Новые материалы и технологии» (г. Москва, ул. Зацепа, д. 43, 109992, Российская Федерация), buluchevskaya.ad@rea.ru

Аннотация. целью данной работы являлось создание эластомерных композиционных материалов со слоистыми и сферическими наполнителями схожего химического состава. В качестве объекта исследования выступали эластомерные композиты на основе этиленвинилацетата, с добавлением в качестве наполнителя алюмосиликатных ценосфер, слюды, стекловолокна. Наполнители были покрыты серебром путем химической металлизации – автокаталитическим осаждением металла из раствора. Показано влияние геометрии наполнителя и наличия модификации на эксплуатационные характеристики композита. Изучены морфология, термическая стойкость и физико-механические показатели полученных материалов. Определено, что каждая из систем оказывает уникальное влияние на структуру и свойства композитов. Так, слоистые наполнители обеспечивают высокую жесткость и барьерные свойства, но склонны к агломерации, усложняющей переработку. Волокнистые наполнители эффективно армируют матрицу и повышают прочность, но могут вызывать локальные концентрации напряжений. Сферические наполнители, напротив, улучшают перерабатываемость и равномерность распределения, однако слабо участвуют в передаче механических нагрузок, что ограничивает рост прочности.
Ключевые слова: композиционные материалы, этиленвинилацетат, слоистые наполнители, сферические наполнители, поверхностная металлизация.

COMPOSITE POLYMER MATERIALS BASED ON ETHYLENE VINYL ACETATE WITH LAYERED AND SPHERICAL FILLERS

Buluchevskaya Anastasia Dmitrievna, student, **Belyaeva Natalia Olegovna**, student, **Sukhareva Ksenia Valerievna**, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher

Plekhanov Russian University of Economics, Higher Engineering School “New materials and technologies” (Moscow, 43 Zatsepa Street, 109992, Russian Federation), buluchevskaya.ad@rea.ru

Abstract. The purpose of this work was to create elastomeric composite materials with layered and spherical fillers of similar chemical composition. The object of the study was elastomeric composites based on ethylene vinyl acetate, with the addition of aluminosilicate cenospheres, mica, and fiberglass as fillers. The fillers were coated with silver by chemical metallization – autocatalytic deposition of metal from solution. The influence of the filler geometry and the presence of modification on the performance characteristics of the composite is shown. The morphology, thermal stability, and physico-mechanical properties of the obtained materials have been studied. It is determined that each of the systems has a unique effect on the structure and properties of composites. Thus, layered fillers provide high rigidity and barrier properties, but are prone to agglomeration, complicating processing. Fibrous fillers effectively reinforce the matrix and increase strength, but they can cause local stress concentrations. Spherical fillers, on the contrary, improve processability and uniformity of distribution, but they are poorly involved in the transfer of mechanical loads, which limits the growth of strength.
Keywords: composite materials, ethylene vinyl acetate, layered fillers, spherical fillers, surface metallization.

Введение

Свойства наполненных полимерных композитов определяются характеристиками полимерной матрицы, дисперсного наполнителя и их взаимодействием на границе раздела [1]. Выбор наполнителей для полимерных композиционных материалов требует учета множества факторов, включая требуемые механические, термические, электрические свойства, технологичность, стоимость и экологичность.

Значительное количество современных исследований посвящено влиянию наполнителей на свойства композитных материалов. Основное внимание уделяется функциональным характеристикам получаемых композитов, а также перспективным направлениям развития в этой области [2]. В ряде работ рассматривается влияние морфологии, дисперсии и межфазных взаимодействий наполнителей на свойства композитов [3]. В работах также изучается влияние поверхностной модификации наполнителей на свойства полимерных композитов [4, 5]. Показано, что модификация наполнители улучшает их адгезию к полимерной матрице, что приводит к повышению прочности, ударной вязкости и термической стабильности. Активно исследуется применение наполнителей разной структуры, размера и происхождения.

Объекты и методы

В рамках данного исследования для создания композиционных

материалов в качестве полимерной матрицы использовался этиленвинилацетат (ЭВА) (марка ES28005 LG, Южная Корея) со следующими характеристиками: содержание винилацетата – 28%, плотность 0.951 г/см³, температура плавления 72°C. Этиленвинилацетат – легкий и термостойкий материал, устойчивый к маслам, растворителям и озону. Обладает хорошей адгезией, эластичностью и прозрачностью.

В работе использовались три вида наполнителей: алюмосиликатные ценосферы, стекловолокно, слюда. Внешний вид выбранных наполнителей представлен на рисунках 1-3.



Рис. 1. Изображение внешнего вида алюмосиликатных ценосфер



Рис. 2. Изображение внешнего вида слюды



Рис. 3. Изображение внешнего вида стекловолокна

В данной работе было проведено серебрение наполнителей методом

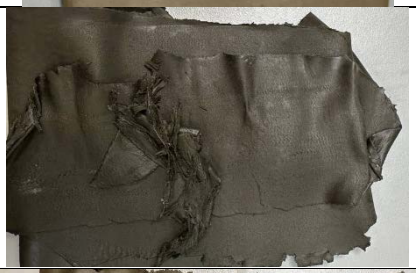
автокаталитического осаждения по следующей методике (таблица 1):

Таблица 1. Методика химической металлизации наполнителей серебром

Этап 1	Приготовление 470 мл раствора $AgNO_3$ (раствор А)
Этап 2	Приготовление раствора В (420 мл этилового спирта + 6,25 мл формалина)
Этап 3	Введение наполнителя в раствор А на 30 минут при t 50℃
Этап 4	Постепенное введение в раствор А раствора В при перемешивании в течение 20 минут
Этап 5	Фильтрация раствора
Этап 6	Высушивание наполнителя в сушильном шкафу при t 50℃

Предварительно наполнители были измельчены до единого размера с помощью вихревого электромагнитного гомогенизатора ВЭГ-80. Модифицированные наполнители были введены в полимерную матрицу в количестве 60 мас. %. Компаундирования эластомерных смесей было осуществлено на лабораторных смесительных вальцах UBL-6175-BL (КНР). Внешний вид полученных композитов представлен в таблице 2.

Таблица 2. Характеристика полученных эластомерных композитов

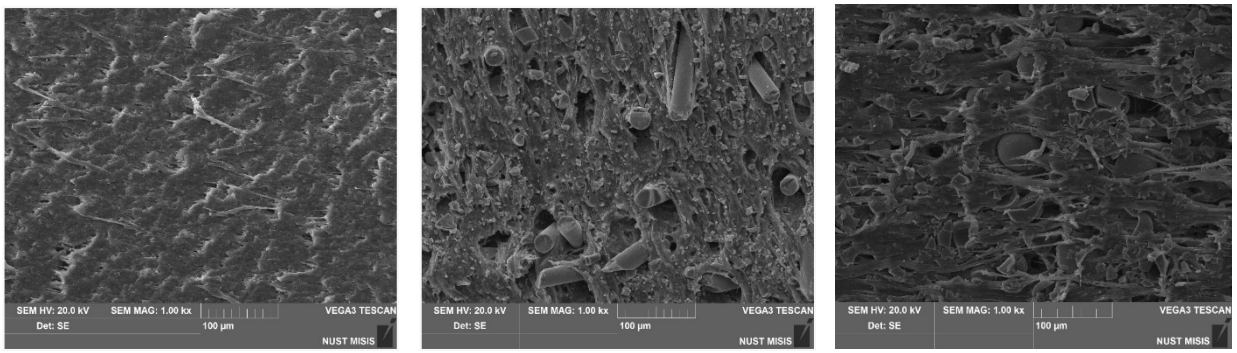
Объект исследования	**Обозначение**	**Изображение**
Эластомерные композиты со слюдой	ЭВА/Слюда	
Эластомерные композиты с посеребренной слюдой	ЭВА/Слюда +серебро	
Эластомерные композиты с ценосферами	ЭВА/ЦС	

Продолжение таблицы 2.

Эластомерные композиты с посеребренными ценосферами	ЭВА/ЦС +серебро	
Эластомерные композиты со стекловолокном	ЭВА/Стекловолокно	
Эластомерные композиты с посеребренным стекловолокном	ЭВА/Стекловолокно +серебро	

Результаты и обсуждение

Морфология композитов на основе ЭВА была проанализирована с использованием сканирующей электронной микроскопии (рисунок 4).



а *б* *в*

Рис. 4. СЭМ-изображение образцов при увеличении 1000× со следующими наполнителями: слюда (а), стекловолокно (б), ценосферы (в)

Для всех образцов характерна плотная структура излома без выраженных макропор, однако в зависимости от типа наполнителя наблюдаются принципиальные различия в деталях микроструктуры. Композит ЭВА/слюда демонстрирует равномерное распределение тонких пластинчатых частиц, ориентированных преимущественно в плоскости деформации. Контакт между частицами и полимерной матрицей в целом плотный, однако в некоторых зонах наблюдаются микротрещины и локальные пустоты,

указывающие на наличие напряжений на границе раздела. Такая структура обеспечивает повышенный модуль упругости, но ограничивает пластичность материала.

В образце ЭВА/стекловолокно выявлены многочисленные следы вырыва волокон, гладкие торцы и пустоты на месте разрушения, что свидетельствует о слабой межфазной адгезии. Волокна частично ориентированы, однако неравномерное распределение и отсутствие прочного сцепления с матрицей приводят к преждевременному разрушению при нагрузке, снижая прочность на разрыв.

Композит ЭВА/ценосферы характеризуется присутствием сферических частиц различного диаметра, равномерно распределенных в матрице. В большинстве случаев наблюдается слабое взаимодействие между полимером и наполнителем, проявляющееся в виде межфазных пустот и отслоений. Такая структура может инициировать микротрещины и локализованные зоны разрушения, снижая общее удлинение при разрыве.

С помощью универсальной испытательной машины были исследованы физико-механические характеристики полученных композитов. Полученные значения приведены в таблице 3.

Таблица 3. Физико-механические характеристики образцов с различным наполнителями в композите

Образец	Условная прочность (МПа)	Предел текучести σ_s (МПа)	Удлинение при разрыве (%)
ЭВА (чистый)	5,62	2,54	525,79
ЭВА + слюда	8,00	4,60	15,83
ЭВА + слюда + Ag	9,00	5,01	18,7
ЭВА + стекловолокно	3,59	1,96	16,67
ЭВА + стекловолокно + Ag	4,02	2,20	17,39
ЭВА + ценосферы	4,20	3,67	5,41
ЭВА + ценосферы + Ag	4,20	3,19	6,80

Чистый ЭВА демонстрирует типичные свойства эластомерного материала: высокая удлиненность при разрыве (525,79%) при умеренном временном сопротивлении разрыву (5,62 МПа) и сравнительно низком модуле упругости (11,72 МПа). Такая комбинация свойств характерна для полимеров с низкой степенью кристалличности и высокой подвижностью макромолекул.

Добавление неорганических наполнителей приводит к значительным изменениям механического поведения. Введение слюды повышает модуль упругости до 139,56 МПа и временное сопротивление до 8,00 МПа, но снижает удлинение до 15,83%. Модификация слюды серебром изменяет эти характеристики, усиливая жесткость композита и его прочность: модуль упругости достигает 151,02 МПа, временное сопротивление – 9,00 МПа,

удлинение – 18,70%. Аналогичные результаты наблюдаются для композитов со стекловолокном: модуль упругости увеличивается до 55–57 Мпа. Модификация стекловолокна серебром способствует дальнейшему увеличению предела текучести и временного сопротивления разрыву при сохранении низкой, но стабильной пластичности (~17%). Введение ценосфер повышает жесткость до 116,14 МПа, но снижает удлинение при разрыве до 5,41%. Модификация ценосфер серебром уменьшает модуль упругости до 100,91 МПа, но увеличивает удлинение до 6,80%, вероятно за счет улучшения сцепления с полимерной матрицей.

Для определения термостойкости композитов был произведен термогравиметрический анализ. Данные расчетов обобщены в таблице 4.

Таблица 4. Данные по анализу ТГ- и ДТГ-кривых термоокислительной деструкции эластомерных композитов

Образец	T_onset (°C)	T_max (°C)	Остаток (%)
ЭВА (чистый)	408,9	450	4,8
ЭВА + слюда	446,0	481,3	56,0
ЭВА + слюда + Ag	453,1	484,0	56,7
ЭВА + стекловолокно	449,4	479,0	60,0
ЭВА + стекловолокно + Ag	452,5	481,0	60,1
ЭВА + ценосферы	452,9	483,3	57,8
ЭВА + ценосферы + Ag	450,9	481,3	57,4

Чистый ЭВА разлагается в две стадии: начало деструкции при 410 °C, основной пик – при 450 °C. Остаточная масса при 750-800 °C менее 5%. Неорганические наполнители повышают термическую стабильность: температура начала разложения (T_onset) смещается до 450-455 °C, максимальная скорость деструкции (T_max) – до 479–485 °C. Модификация наполнителей серебром не приводит к радикальному изменению характера разложения, однако способствует дополнительной стабилизации: температура начала и максимума разложения незначительно повышаются по сравнению с соответствующими системами без серебра. Уровень остаточной массы при 900 °C – 56–60% для всех композитов с наполнителями, что согласуется с расчетной долей неразлагаемых компонентов. Наибольший остаток у систем со стекловолокном и ценосферами.

Выводы

По результатам проведенного исследования установлено, что тип наполнителя и характер его модификации оказывают существенное влияние на поведение композита. Наиболее сбалансированные характеристики прочности, жесткости, термостабильности показал композит с добавлением модифицированной серебром слюды. Системы с ценосферами продемонстрировали хорошие термические свойства, а композиты со стекловолокном обеспечили устойчивое сочетание механических и тепловых

параметров.

Список использованных источников:

1. Мельниченко, М. А. Влияние состава наполнителей на свойства полимерных композиционных материалов / М. А. Мельниченко, О. В. Ершова, Л. В. Чупрова. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2015. — № 16 (96). — С. 199-202.
2. Mazitova A.K., Zaripov I.I., Aminova G.K., Ovod M.A., Suntsova N.V. Fillers for polymer composite materials // Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal. - 2022. - Vol. 14, No. 4. - P. 294-299.
3. Bokobza L. Elastomer Nanocomposites: Effect of Filler–Matrix and Filler–Filler Interactions // Polymers. – 2023. – Vol. 15(13).
4. Müller S., Wagner H., Schmidt P. Influence of Filler Surface Modification on the Properties of PP Composites // Surface Modification of Nanoparticle and Natural Fiber Fillers. – 2016. – P. 83-108.
5. Patel R. K., Sharma S., Gupta V. K. Elastomeric-Based Composite Materials for Engineering Applications // Polymer Composites. – 2023. – P. 329-355.

УДК 642.31
642.34

«ШУХОВСКИЕ ШТРИХИ» КИСЛОВОДСКОГО КУРЗАЛА

Бурминский Александр Валерьевич [1], преподаватель физики**, Марутян Александр Суренович [2],** канд. тех. наук, доцент

[1] Государственное бюджетное профессиональное учреждение «Кисловодский государственный многопрофильный техникум» (г. Кисловодск ул. Челюскинцев 5, 357736, Российская федерация), sasha_burmins@mail.ru

[2] Ведущий научный сотрудник отдела организации проектно-грантовой деятельности, преподаватель колледжа, Пятигорский институт (филиал) Северо-Кавказского федерального (г. Пятигорск ул. 40 лет октября 56, г. Пятигорск, 357502 Российская федерация) al_marut@mail.ru

Аннотация. Наследие Владимира Григорьевича Шухова, как гениального русского инженера, учёного и изобретателя, насчитывает множество примеров архитектурных сооружений, каждое из которых – произведение не только инженерной мысли создателя, но искусства в самом широком понимании

этого слова. При этом штрихи Шухова можно проследить во множестве городов, в том числе и в Кисловодске. В данной статье рассмотрены примеры архитектурных конструкций мостового типа, в основе которых – ферменные конструкции. При этом данные мосты являются не только историческим наследием Кавказских Минеральных Вод, но и действующими объектами инфраструктуры, выполняющие свои прямые функции и находящиеся в эксплуатации. Следует отметить, что чертежа с подписью Шухова по поводу данных мостов не сохранилось, однако если учесть, что мосты проектировались и собирались в фирме «Гостынский и Ко», в которой в то время главным инженером был Владимир Григорьевич, то есть вероятность, что эти мосты были сконструированы под влиянием Шухова. По мнению авторов, если будет обнаружен чертёж с его подписью, то мосты смогут занять своё место в историческом наследии архитектур Владимира Григорьевича.
Ключевые слова: Ферменные конструкции, Шухов, мосты, Курзал, фермы Полонсо, фермы второго класса рациональности.

"SHUKHOV'S STROKES" OF THE KISLOVODSK KURZAL

Burminsky Alexander Valerievich [1], physics teacher**, Marutyan Alexander Surenovich** [2], Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

[1] State Budgetary Professional Institution "Kislovodsk State Multidisciplinary Technical School" (5.357736 Chelyuskintsev str., Kislovodsk, Russian Federation), sasha_burmins@mail.ru

[2] Leading Researcher of the Department of Organization of Project and Grant activities, college lecturer, Pyatigorsk Institute (branch) North Caucasus Federal District (Pyatigorsk, ul. 40 let Oktyabrya 56, Pyatigorsk, 357502 Russian Federation) al_marut@mail.ru

Abstract. The legacy of Vladimir Grigoryevich Shukhov, as a brilliant Russian engineer, scientist and inventor, includes many examples of architectural structures, each of which is a work not only of the creator's engineering thought, but of art in the broadest sense of the word. At the same time, Shukhov's strokes can be traced in many cities, including Kislovodsk. This article discusses examples of bridge-type architectural structures based on truss structures. At the same time, these bridges are not only the historical heritage of the Caucasian Mineral Waters, but also existing infrastructure facilities that perform their direct functions and are in operation. It should be noted that the drawing with Shukhov's signature on these bridges has not been preserved, however, if we consider that the bridges were designed and assembled by the Gostynsky and Co company, in which Vladimir Grigorievich was the chief engineer at that time, then there is a possibility that these bridges were designed under the influence of Shukhov. According to the authors, if a drawing

with his signature is discovered, the bridges will be able to take their place in the historical heritage of Vladimir Grigorievich's architecture.
***Keywords*:** Trusses, Shukhov, bridges, Kurzal, Polonso farms, farms of the second class of rationality.

Введение

Развитие отечественного строительства невозможно без упоминания знаменитого инженера Владимира Григорьевича Шухова. 28 августа 2023 года отмечалось 170-летие со дня рождения, а 2 февраля 2024 года – 85-летие его трагического ухода из жизни. Конструкции Шухова, поразившие его современников, и по сей день вызывают восторг не только у специалистов, но и людей, далёких от строительства и архитектуры.

Завершение строительства железной дороги от станицы Султановская до Кисловодска ознаменовало начало нового этапа существования города. Длительные путешествия на каретах и бричках, которые могли занимать до нескольких часов времени, теперь можно было проделать по безопасной железной дороги, затратив при этом намного меньше времени. Количество посетителей города возросло, что привело к развитию курортных рекреаций. Однако одна проблема оставалась не решена – место ожидания пассажиров было не готово.

Кроме того, существовала определённая традиция встречи поездов. К этому обязывало само название Вокзал. Первоначально вокзалами, или точнее «воксалами», называли увеселительные сады и парки с павильонами, где проводились маскарады, балы и концерты (от английского Vauxhall — названия сада Воксхолл-Гарденз, открывшегося в 1660 году в Кеннингтоне, неподалеку от Лондона). С конца XVIII века подобные общественные сады получали все большее распространение в Петербурге, а затем и по всей Российской империи [12].

Ещё в 1892 году архитектором В.В. Гусевым был предложен проект строительства Курзала, как места для отдыха и развлечения отдыхающих в Кисловодске. Расположение было определено так: на небольшом холме подле вокзала, в тени Крестовой горы. Проект рассматривался длительное время, после чего был дополнен инженером М.С. Кребездом, архитектором М.В. Лаврентьевым и инженером Е.И. Дескубесом [1-5].

Полученный проект начали реализовывать в 1895 году по предложению известного деятеля Сафонова. Строительство было грандиозным: необходимо было срыть вершину изолированной возвышенности, позднее привезти камень для строительства (использовался доломит из каменоломни недалеко от Кисловодска, а также жёлтый кирпич с завода Л. В. Штейнгеля и В. И. Грозмани), после чего возвести уникальное сооружение.

Исторически первая часть была завершена в 1895 году. Состояла она из ресторана и небольшой благоустроенной территории, на которой располагались столики. К 1896 году был открыт концертный зал, однако отделочные работы были завершены только к 1897 году. Стоимость постройки

составляла около 1 миллиона царских рублей золотом. Эксплуатацией зала в 19 веке занимался антрепренёр В.Л. Форкатти, а его музыкальным рецензентом был архитектор Э.Б. Ходжаев. Действовал симфонический оркестр на 80 человек. В концертном зале выступали Ф.И. Шаляпин, В.Ф. Комиссаржевская, В.И. Качалов, Л.В. Собинов, И.В. Тартаков, А.В. Нежданова, Н.А. Обухова, М.М. Фокин и другие.

Материалы и методы

Параллельно со строительством курортного зала на соседнем холме возводился небольшой парк отдыха. Первоначальный проект представлял небольшие прогулочные тропы, столы для игорных и увеселительных мероприятий, настольного тенниса, который только входил в моду и прочих увеселений. Появление развлекательного центра и дальнейшее его развитие привело к необходимости соединить оба участка воедино. Таковыми стала пара ажурных мостов, проходящих по обе стороны от главного здания Курзала. Мосты эти, несмотря на кажущуюся простоту и изящность, весьма надёжны, и способны выдержать ветровые порывы, землетрясения и другие воздействия, встречающиеся в жизненном цикле любого здания или сооружения. Оставаясь лёгкими и изящными конструкциями, ферменные мосты до сих пор выполняют свою основную функцию.

Два моста эти имеют и свои названия: южный мостик "Уединение" - к Крестовой горе и северный мостик "Вздохов". Мост вздохов получил своё название потому, что гулявшие по территории небольшого парка Курзала дамы, часто заходившие на мост, вздыхали от того, как столь лёгкий мост может выдерживать их и даже не качаться. С высоты моста действительно кажется, что мост парит в воздухе. Металлический пешеходный мостик был изготовлен на заводе "временного московского купца первой гильдии" и инженера Александра Вениаминовича Бари (1847-1913), а металлическая ограда в виде волн сделана на фабрике фирмы "Гостынский и К" в Варшаве. Главным инженером завода А. В. Бари был "первый инженер Российской империи" Владимир Григорьевич Шухов [6,9].

По конструкции "Мостик уединения" значительно сложнее, нежели его мост-близнец. Гора Крестовая – коварное для строительства место, поскольку имеет особенность: структура горы такова, что она постепенно ползёт. Это стало причиной, по которой долгое время на горе Крестовой не было никаких поселений и построек. Лишь небольшое количество инженеров (И.Д.Иноземцев, Э.Б. Ходжаев) брали на себя смелость разработки проектов для данного места. Не исключением стало и техническое решение моста, которое оказалось простым, но вместе с тем весьма оригинальным. Он имеет один пролет и мощный каменный упор, чем-то напоминая подъемный мост средневекового замка. Это решение вызывает впечатление, что мост зависает на одной точке, что ещё раз подчёркивает его лёгкость и ажурность. При это его надёжность ни у кого не вызывает ни малейшего сомнения. Этот факт лишний раз подтверждается тем, что в настоящее время в нарушение всех

норм и правил им пользуются водители индивидуальных средств перемещения.

Работы по монтажу моста велись рабочими Владикавказской железной дороги по проекту одного из её инженеров-путейцев, который отвечал за ремонт зданий Курзала. Мост вместе с новым парком был открыт в начале летнего сезона 1909 года.



Рис. 1. Мосты близнецы: Мост Вздохов

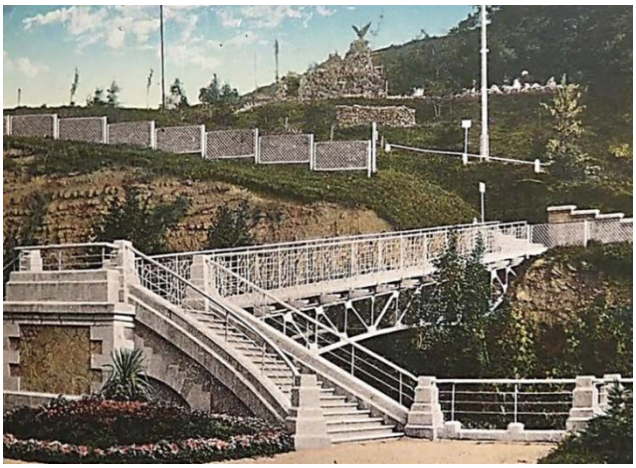


Рис. 2. Мосты близнецы: Мост уединения [2,3]

Кроме мостов-близнецов, площадка Курзала имеет и менее известный, но не менее интересный мост. Эта небольшой консольный мост, которым площадка Курзала соединяется с верхним этажом здания – бывшей гостиницы «Гранд отель». Консольный мост заблокирован уже долгое время, не эксплуатируется, теряя не только свой функционал, но и техническое состояние. Чтобы продлить его жизненный цикл, желательно чтобы он был в эксплуатации. Для этого можно было бы превратить верхний этаж в общественно полезный и доступный объект, например, картинную галерею.

Кисловодские мосты, изготовленные фирмой, в которой работал Шухов, безусловно, относятся к памятникам архитектуры, охраняемых государством. Кроме них Шухов разработал серию стропильных конструкций, оптимизировав фермы Полонсо. Эта серия включает плоские ферменные системы, относящиеся к числу наиболее распространённых строительных конструкций зданий и сооружений. Не удивительно, что в очерках по истории металлических конструкций им отведена конструктивная форма №2, где лидерство отдано двутавровым балкам. Сам Шухов классифицировал оптимизированные им фермы как конструкции 2 класса рациональности [4]. Однако и эти конструкции можно модернизировать при помощи Y-образных и Ψ-образных стоек. (Рисунок 3 [6]).

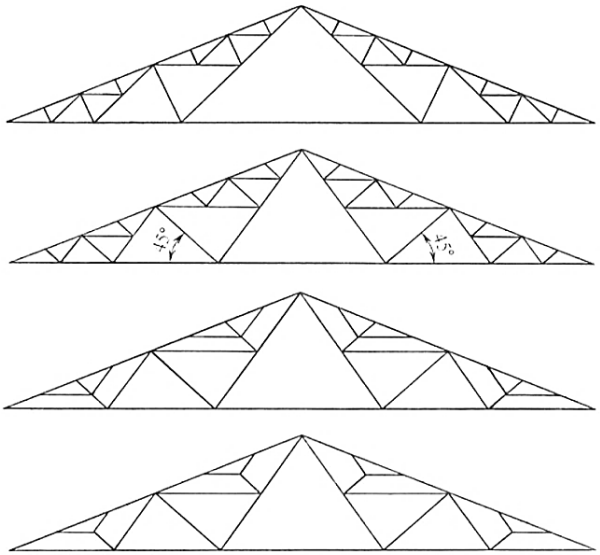
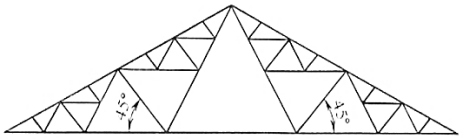
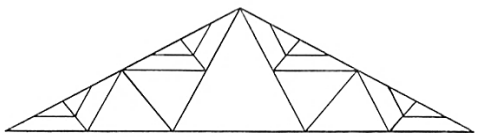
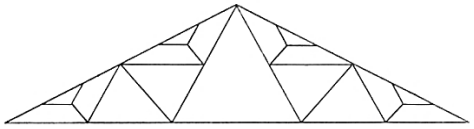


Рис. 3. Примеры модернизации классических ферм серии Шухова [4] с применением стоек, имеющих ϒ-образные и Ψ-образные очертания. [5]

Результаты и обсуждения

Результатом подобной модификации является оптимизация технологического процесса ферм 2-ого класса рациональности, уменьшив количество узлов. При этом использование ϒ-образного очертания сопровождается еще большим разрежением решетки ферменной конструкции. Количественная оценка использования подобных методов усовершенствования ферм инженера В.Г, Шухова представлены в таблице 1.

Таблица 1. Количественная оценка использования методов усовершенствования ферм инженера Шухова.

Схемы ферм	Наименование стержней	Кол-во шт.	Наименование узлов	Кол-во шт.
	Раскосы Стойки Полураскосы Полустойки	6 2 8 12	Опорные Верхние Нижние Промежуточные	2 15 6 8
	Итого	28 100%	Итого	31 100%
	Раскосы Стойки Полураскосы Полустойки	6 2 8 4	Опорные Верхние Нижние Промежуточные	2 15 4 6
	Итого	20 71,4%	Итого	27 87,1%
	Раскосы Стойки Полураскосы Полустойки	6 2 8 4	Опорные Верхние Нижние Промежуточные	2 10 4 6
	Итого	20 71,4%	Итого	22 71,0%

Анализ результатов

Исходя из данных, представленных в таблице 1, количество стержней решёток сократилось на 28,6%, что привело к сокращению узловых соединений (12,9…29%). Подобное изменение приводит к дополнительному уменьшению массы конструкции, что является рациональным, поскольку получившиеся конструкции менее трудоёмки и затратны в сборке, транспортировке, монтаже, эксплуатации. Данные модификации были апробированы и реализованы в рамках строительства нескольких реальных проектов и зданий.

Апробация данных ферм было произведено на нескольких объектах Ставропольского края. Кроме апробации данных модификаций в виде строительных ферм новых образцов, данные изобретение получили патенты на изобретение, что также подтверждает инновационность данного решения [10,11]. Данные патенты были созданы в рамках возможных оптимизаций современных ферменных прогонов и ферменных систем, что позволяет значительно расширить возможность применения современных ферменных конструкций при этом достигнув наиболее оптимальных параметров системы при минимальных затратах материала.

Рис. 4. Применение Ψ-образных модификаций в строительстве.

Список используемых источников.

1. С. В. Боглачёв, С. Н. Савенко. Курзал железной дороги // Архитектура старого Кисловодска. — Пятигорск: Снег, 2012. — 516 с.

2. https://dzen.ru/a/ZhJ2Cioz1CKqUPuz (Дата обращения 4.05.2025)

3. https://pastvu.com/p/889001?history=1550171009965 (Дата обращения 4.05.2025)
4. Группа «Историко-краеведческий музей «Крепость», пост https://vk.com/wall-212283565_960 (Дата обращения 4.05.2025)
5. Торчинов В. А. Владикавказ : Краткий историко-краеведческий справочник. — Владикавказ: Северо-Осетинский научный центр, 1999. — С. 144. — 221 с.
6. Перельмутер А. В. Очерки по истории металлических конструкций: Научнопопулярное издание. М: Издательство АСВ, 2015. С. 81–86.
7. Металлические конструкции академика В.Г. Шухова / Отв. ред. В.П. Мишин. М.: Наука, 1990. 112 с.
8. Ефремова Е.А., Сергеева А.А., Аветян Н.Ю., Марутян А.С., Модернизация стержневых конструкций Шуховской серии, Современная наука и инновации. 2024. № 2 (46). 222 с.
9. Шухов В. Г. Строительная механика / Избранные труды. М.: Наука, 1977. С. 65–139
10. Марутян А.С. Треугольная решетка стержневых конструкций с дополнительными полустойками и полураскосами (Y-образными стойками) // Патент № 2618810. 11.05.2017.
11. Марутян А.С. Треугольная решетка стержневых конструкций с дополнительными стойками и полураскосами // Патент № 2573889. 27.01.2016.
12. https://arzamas.academy/mag/912-pavlovsk (Дата обращения 4.05.2025)

УДК 004.42(075)

ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ И МОНИТОРИНГУ ДВИЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТА НА ДОРОГАХ РЕГИОНАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ

Вихрев Александр Владимирович [1], к.т.н., доцент, зав. кафедрой автомобильных дорог, **Кандрашкина Юлия Сергеевна** [2], ассистент кафедры автомобильных дорог

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), [1]user1268@gmail.com, [2]juliakandrashkina@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрена и адаптирована наиболее эффективная методика подсчета интенсивности на региональных дорогах Владимирской области по сравнению с ручным методом. Проведен сравнительный анализ по следующим критериям: количество захватывающих полос, градации транспортных средств, скорость обработки, срок эксплуатации и экономическому показателю. Подведён общий вывод о рентабельности метода использования искусственного интеллекта. Проведен сравнительный анализ программного комплекса «Интенсивосчет», разработанного на кафедре «Автомобильные дороги» с продуктами «Индор» и «VAS». Сделан вывод об эффективности применения программного комплекса «Интенсивосчет» по сравнению с продуктами «Video Analytics Software» и «Индор». Разработана методика по применению программного обеспечения «Интенсивосчет». Рассчитаны социально-экономический эффект от внедрения программного обеспечения «Интенсивосчет» на региональные дороги Владимирской области.

Ключевые слова: Интенсивность автомобильного движения, загруженность автомобильного потока, автомобильные дороги, нейронные сети, искусственный интеллект.

INNOVATIVE APPROACHES TO THE ANALYSIS AND MONITORING OF TRAFFIC ON REGIONAL ROADS

Vikhrev Alexander Vladimirovich [1], PhD, Associate Professor, Head of the Department of Roads, **Kandrashkina Yulia Sergeevna** [2], Assistant of the Department of Roads

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), [1]user1268@gmail.com, [2]juliakandrashkina@gmail.com

Abstract. The article considers and adapts the most effective method of calculating traffic intensity on regional roads in the Vladimir region, compared to the manual method. A comparative analysis is conducted based on the following criteria: the number of lanes, vehicle gradations, processing speed, service life, and economic indicators. A general conclusion is drawn about the profitability of using artificial intelligence. A comparative analysis is conducted between the Intensivoschet software developed by the Department of Roads and the Indor and VAS products. The effectiveness of using the Intensivoschet software package has been compared to the Video Analytics Software and Indor products. A methodology has been developed for using the Intensivoschet software. The socio-economic benefits of implementing the Intensivoschet software on regional roads in the Vladimir region have been calculated.
Keywords: Traffic intensity, traffic congestion, highways, neural networks, artificial intelligence.

Введение

Количество транспорта, пересекающего конкретный участок дороги в течение заданного временного промежутка в обе стороны, определяет загруженность автомагистрали. Нормативный документ СП 34.13330.2012 "Автомобильные дороги" устанавливает допустимые показатели трафика для различных типов дорог. При расчетах учитывается среднесуточный годовой поток, конвертированный в эквивалент легковых машин за прошедший год. Перегруженность транспортных артерий влечет серьезные последствия: ускоренное разрушение дорожного покрытия, повышение температурного режима асфальта, рост аварийности и увеличение расходов на эксплуатационное обслуживание.

Существует ряд подходов к решению указанных проблем. Рассмотрим основные методы, начиная с программного. Технология реализуется в России через системы "VAS" и "IndorIntensity". Технико-экономические показатели этих продуктов отражены в табл. 1. Данный метод отличается автоматической обработкой информации и обеспечивает точный подсчет интенсивности, хотя требует технического обслуживания и экономически затратен.

Альтернативой выступает визуальный (ручной) метод. Его технико-экономические параметры (см. табл. 1) демонстрируют как достоинства – отсутствие необходимости в дорогостоящем оборудовании и простоту внедрения, так и недостатки – значительные временные затраты на обработку данных и низкую экономическую эффективность [1].

Использование специализированного оборудования представляет собой третий способ измерения плотности транспортного потока. Среди популярных устройств выделяются детекторы на основе индукционных петель, радарные системы и камеры-регистраторы. Хотя такие установки обеспечивают высокую точность и скорость сбора данных, они имеют существенные недостатки: высокую стоимость и стационарный характер размещения.

Существующие технические решения, несмотря на их преимущества, не справляются с оперативным анализом дорожной ситуации и формированием аналитических отчетов (см. табл. 1). Именно поэтому современные системы мониторинга дополняются технологиями искусственного интеллекта.

Таблица 1. Сравнение методов

Параметры для сравнения	Визуальный	«Video Analytics Software» (программное обеспечение)	«IndorIntensity» (программное обеспечение)	Индукционные петли (устанавливаемое оборудование)
Количество захватываемых полос	До 8	До 2	До 6	1
Количество типов транспортных средств	14	8	13	6
Мобильность	+	-	-	-
Скорость обработки	От 2 часов	От 15 минут до часа	От 1 часа	1 секунды
Срок эксплуатации	Без ограничений	5-7 лет	1 год	10 лет
Стоимость, тыс. руб.	От 50	От 150	От 29	От 6

На рисунке 1 представлена методика функционирования, которая легла в основу различных программных продуктов – отечественного "Поток" и зарубежного "Визим".



Рис. 1. Методика функционирования программных продуктов на основе ИИ

Демонстрируются технико-экономические показатели метода, где к преимуществам относятся экономическая эффективность и сокращение времени анализа, а недостатками считаются сложности при инсталляции и возможные технические неполадки. Проанализировав характеристики методов, была сформированы сравнительные диаграммы, учитывающие несколько параметров: число охватываемых полос, классификацию транспортных средств, быстроту обработки данных, длительность использования и экономическую целесообразность [2].

Анализируя круговую диаграмму, становится очевидным преимущество искусственного интеллекта с точки зрения финансовой эффективности. В

итоге, среди всех рассмотренных подходов, ИИ демонстрирует самые высокие показатели рентабельности, что можно увидеть на рисунках 2-7.

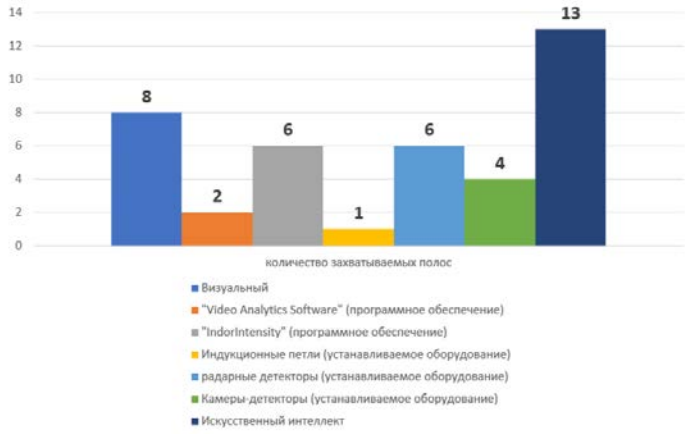


Рис. 2. Сравнительный анализ по количеству захватывающих полос

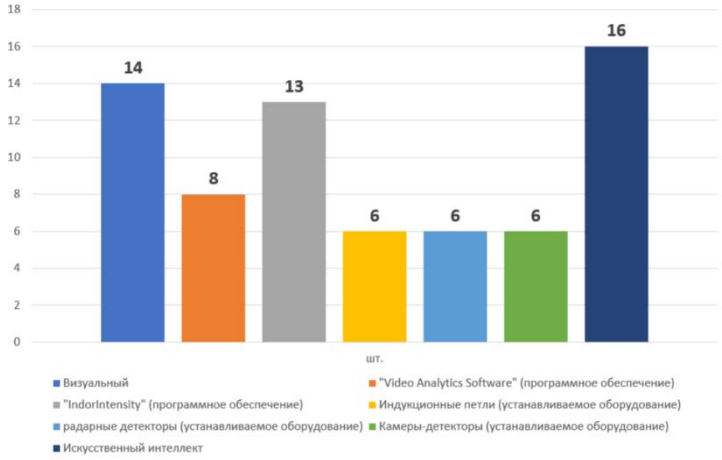


Рис. 3. Сравнительный анализ по градации транспортных средств

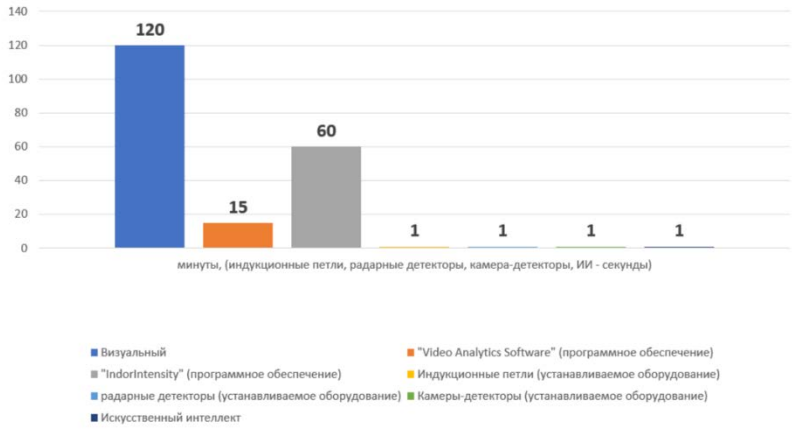


Рис. 4. Сравнительный анализ по скорости обработки данных

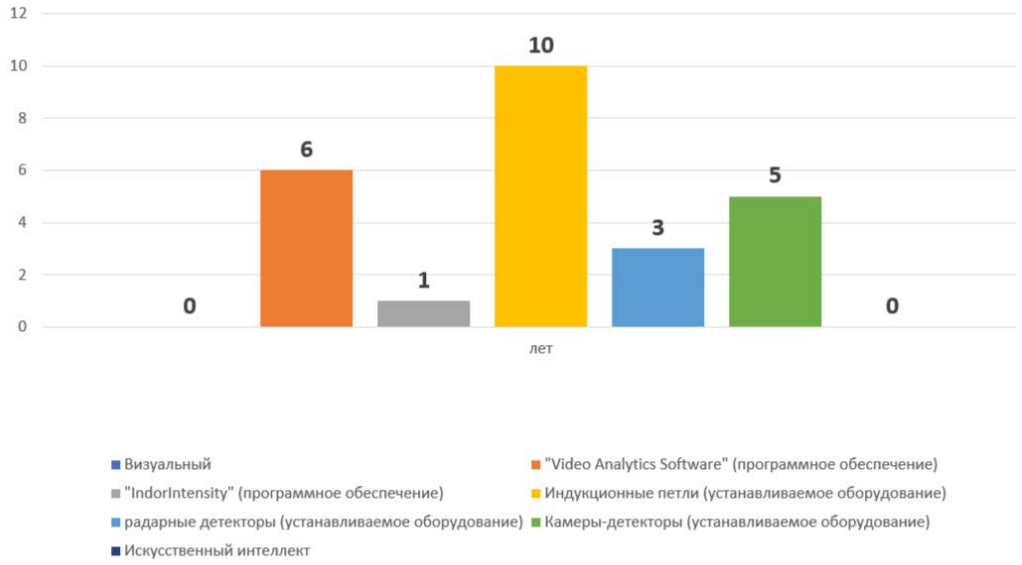


Рис. 5. Сравнительный анализ по сроку эксплуатации

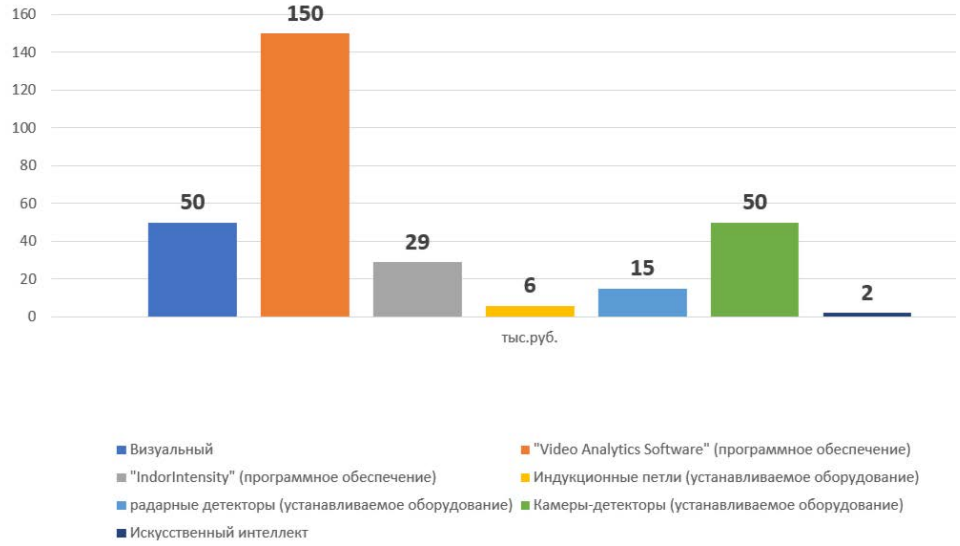


Рис. 6. Сравнительный анализ по экономическому показателю

Методы

Существует ряд способов для оценки плотности транспортного потока, о которых упоминалось ранее. Однако их высокая стоимость делает их недоступными для многих организаций. В связи с этим, научный коллектив кафедры "Автомобильные дороги" разработал инновационный ИИ-комплекс "Интенсивосчет", значительно снижающий затраты на мониторинг загруженности дорог. Методика обучения нейронных сетей данного комплекса была запатентована двумя базами данными № 2025622441 «Методика обучения нейронных сетей для определения интенсивности и загруженности автомобильного потока во Владимирской области». Технологии искусственного интеллекта открывают возможности не только для анализа трафика, но и для обследования инженерных конструкций [3].

В результате сравнительного анализа трех программных решений было определено, что "Интенсивосчет" превосходит конкурентов "Индор" и "VAS" по эффективности на 28% (см. рис. 7.-10.).



Рис.7. Эффективность ИИ по сравнению с ПО



Рис.8. Функциональные признаки



Рис.9. Ценовой сегмент



Рис. 10. Технические требования

Это особенно важно в контексте современных проблем транспортной инфраструктуры. Ведь с ростом трафика наблюдается не только увеличение аварийности и образование заторов, но и ускоренное разрушение дорожного полотна и инженерных сооружений, включая водопропускные трубы. Решением этого комплекса проблем становится внедрение технологий искусственного интеллекта, которые помогают оптимизировать дорожное движение [4].

В настоящее время сервис функционирует исключительно на региональных дорогах Владимирской области, однако в перспективе планируется значительное расширение географического охвата. Структура проекта выстроена на основе фреймворка Spring boot, что обеспечивает возможность эффективного повторного использования разработанного кода. При создании команда руководствовалась стандартной архитектурой, включающей несколько ключевых компонентов, представленных на рисунке 11.

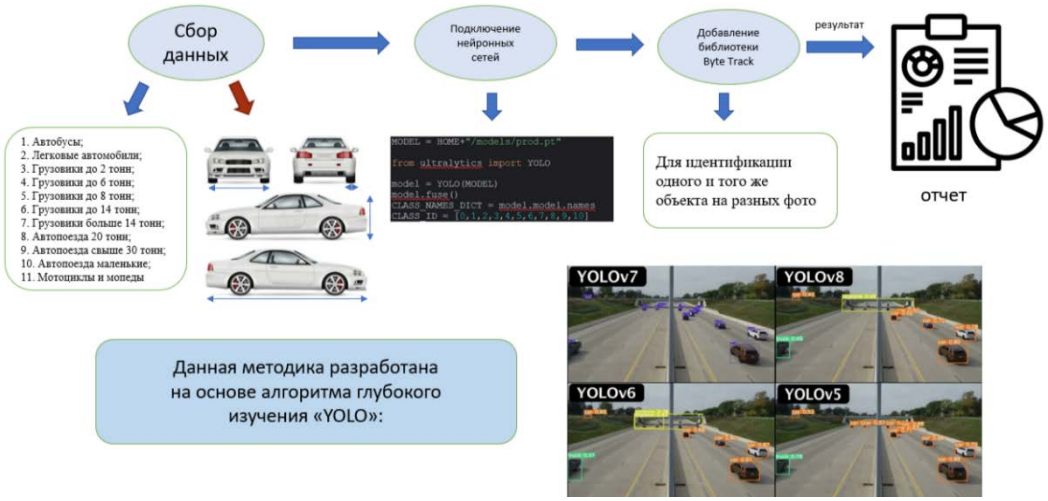
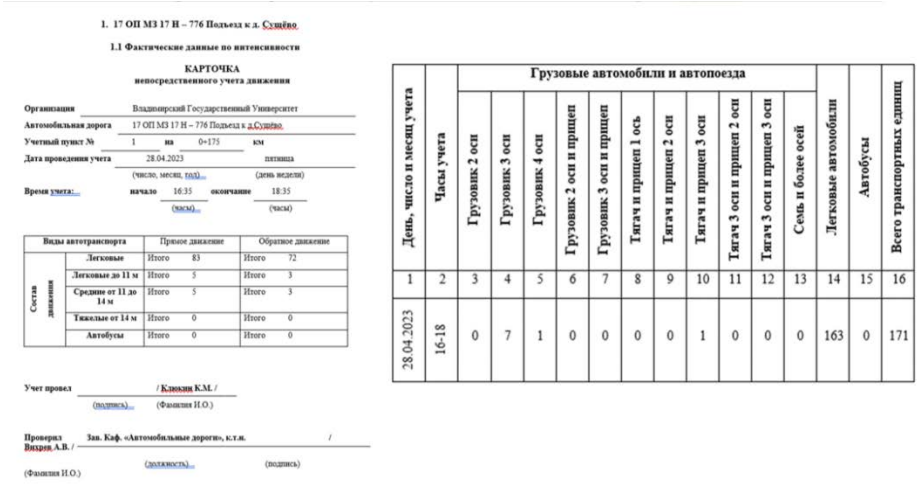


Рис. 11. Методики обучения нейронных сетей для программного комплекса «Интенсивосчет»

Создание инновационного инструмента "Интенсивосчет" с веб-интерфейсом позволило значительно оптимизировать процесс анализа транспортных потоков. После разработки программного обеспечения началась фаза сбора данных для тестирования. Для проверки эффективности системы был выбран участок дороги у деревни Сущёво (ПК0+175), где все параметры движения фиксировались в специальные учетные карточки, представленные рисунком 12.



1. 17 ОП МЗ 17 Н – 776 Подъезд к д. Сущёво

1.1 Фактические данные по интенсивности

КАРТОЧКА
непосредственного учета движения

Организация Владимирский Государственный Университет
Автомобильная дорога 17 ОП МЗ 17 Н – 776 Подъезд к д.Сущёво
Учетный пункт № 1 на 0+175 км
Дата проведения учета 28.04.2023 пятница
(число, месяц, год) (день недели)
Время учета: начало 16:35 окончание 18:35
(часы) (часы)

Виды автотранспорта		Прямое движение	Обратное движение
Состав движения	Легковые	Итого 83	Итого 72
	Легковые до 11 м	Итого 5	Итого 3
	Средние от 11 до 14 м	Итого 5	Итого 3
	Тяжелые от 14 м	Итого 0	Итого 0
	Автобусы	Итого 0	Итого 0

Учет провел / Клюкин К.М. /
(подпись) (Фамилия И.О.)

Проверил Зав. Каф. «Автомобильные дороги», к.т.н. /
Вихрев А.В. /
(должность) (подпись)
(Фамилия И.О.)

День, число и месяц учета	Часы учета	Грузовые автомобили и автопоезда											Легковые автомобили	Автобусы	Всего транспортных единиц
		Грузовик 2 оси	Грузовик 3 оси	Грузовик 4 оси	Грузовик 2 оси и прицеп	Грузовик 3 оси и прицеп	Тягач и прицеп 1 ось	Тягач и прицеп 2 оси	Тягач и прицеп 3 оси	Тягач 3 оси и прицеп 2 оси	Тягач 3 оси и прицеп 3 оси	Семь и более осей			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
28.04.2023	16-18	0	7	1	0	0	0	0	1	0	0	0	163	0	171

Рис. 12. Учетные карточки интенсивности автомобильного потока

Сравнительное тестирование традиционного ручного метода и новой программы продемонстрировало существенные преимущества "Интенсивосчета", представленные рисунками 13-17.



Рис. 13. Прямое движение



Рис. 14. Время обработки



Рис. 15. Стоимость

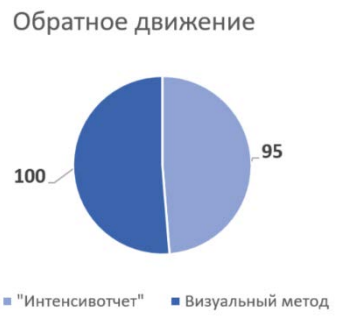


Рис. 16. Обратное движение



Рис. 17. Эффективность

Диаграммы наглядно подтверждают, что применение данного ПО не только значительно сокращает время анализа интенсивности дорожного движения, но и минимизирует расходы на выполнение подобных работ. Ключевым достоинством разработанной системы является комплексный подход к сбору и обработке параметров транспортного потока [5].

Создана инструкция по использованию системы "Интенсивосчет". Начальный шаг включает регистрацию на платформе. Следующий этап позволяет изучить исторические данные интенсивности через раздел «Карта», представленный на рисунке 18. После этого пользователь должен перейти к функции загрузки видеоматериала, где необходимо заполнить информационные поля (включая дату, временные параметры, локацию и идентификационные данные проверяющего) перед загрузкой файла. Заключительным шагом является получение аналитического отчета в формате карточек учета интенсивности, который направляется на электронный адрес пользователя. Презентационный материал содержит спецификации программного комплекса с точки зрения технических характеристик и эксплуатационных параметров.

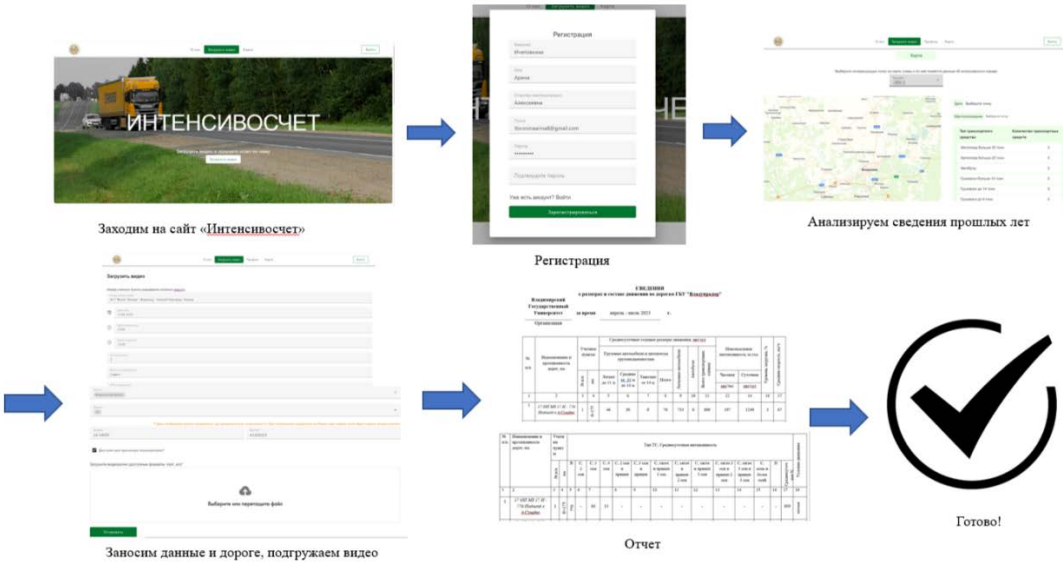


Рис.18. Схема регистрации

Показаны экономические и социальные преимущества от интеграции данной системы на дорожную сеть Владимирской области [6]. Благодаря внедрению этого ПО ожидается существенное улучшение ключевых показателей (см. табл. 2-4).

Таблица 2. Экономия времени от внедрения программы «Интенсивосчет» на дорогах Владимирской области.

Категории времени	час.
Экономия время при поездках на индивидуальном транспорте	46438006,15
Экономия время при поездках на общественном транспорте	34768575,6
Экономия время при поездках на грузовом транспорте	13159910,00
Всего экономия времени	94366491,75

Таблица 3. Экономия времени участников движения благодаря программе "Интенсивосчет" на дорогах Владимирской области.

Годы	Экономия в денежном выражении, тыс. рублей
2023	1150107,5
2024	726429,4
2025	1139986,29
Итого	3016523,19

Таблица 4. Экономия от сокращения количества ДТП за счет внедрения «Интенсивосчет»

Годы		
	Количество погибших, на 100000 человек	Экономия от снижения ущерба, в тыс. рублей
2023	11	767205,261
2024	8	1300091,68
2025	7	1433138,92
Итого:	3500435,86	

Анализ также включал количественную оценку сокращения временных затрат при транспортном передвижении с последующей монетизацией этой экономии [7]. Дополнительно было проведено исследование потенциального снижения аварийности, что позволило рассчитать финансовую выгоду от уменьшения ущерба, связанного с дорожно-транспортными происшествиями [8-9]. Конечный результат финансового периода показал, что наш совокупный доход после вычета всех расходов составил 6 516 958 рублей.

Выводы

Исследования транспортной инфраструктуры во Владимирской области успешно выявили критические точки дорожной сети. Разработанный алгоритм визуального анализа региональных дорог при помощи искусственного интеллекта превосходит конкурентов на 28% по эффективности благодаря доступной цене, техническим требованиям, портативности и удобной системе отчётов.

Применение нейросетей в мониторинге движения транспорта экономически эффективно и оптимизирует процесс, в том числе:

- увеличение средней скорости поездки - 22-23 %;
- сокращение времени задержек - 20-45 %;
- сокращение времени сообщений - 14-27 %;
- сокращение количества остановок - 32-66 %;
- сокращение количества ДТП - 10-25 %;
- снижение расхода бензина - 11-16 %;
- снижение выбросов окиси углерода (CO) - 17-24 %.

Применение стратегии приведет к уменьшению продолжительности поездок, экономии средств на транспортную сеть и созданию безопасных и экологически чистых условий на дорогах [10].

Список использованной литературы

1. Ахметов Л.М., Биков Д.И., Хамидуллин М.Р. Разработка системы для анализа и разгрузки дорожного трафика с применением искусственного интеллекта // International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies. 2021. № 11. С. 88-98. DOI: 10.12731/2227-930X-2021-11-1-87-98

2. Петрушин В.А., Бугаков П. Ю. Разработка программного обеспечения на основе нейросети для оптимизации и анализа дорожного трафика // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ.2020. № 1. С. 93-98. DOI: DOI: 10.33764/2618-981X-2020-7-1-93-98

3. Евсин В. А., Широбокова С. Н., Воробьев С. П. Моделирование и реализация модуля определения дорожного покрытия для автоматического управления транспортным средством с использованием нейронной сети U-NET// Инженерный вестник Дона. 2022. № 1. С. 90-98.

4. Каримов К.С. методы искусственного интеллекта и применение их на транспорте// Постсоветский материк. 2023. № 4. С. 106-115. DOI: 10.48137/23116412-2023-4-106

5. Лысенко, А.Ф. Технология интеллектуальной транспортной системы // Вопросы науки и образования. – 2018. – № 6(18). С. 23-25.EDN UOVENM.

6. Севостьянов, М.А. Анализ показателей эффективности и оценка преимуществ интеллектуальной транспортной системы // Перспективы развития технологий транспортных процессов: материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2022. С. 24-30. DOI 10.34220/PDTPT2022_24-30. – EDN MZHUMF.

7.Еланская М.В., Любичев Д.М., Дормидонтова Т.В. Автоматизированная система управления дорожным движением // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). 2019. №4. С 22-25.

8. Епифанов В.А. Применение методов искусственного интеллекта и машинного зрения в задаче детектирования объектов движения для дальнейшего определения динамических характеристик транспортных потоков // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). 2019. С 25-32. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2019.3.61.20

9. Афонин В.В. Проблемы и перспективы внедрения интеллектуальных систем в сферу обеспечения безопасности дорожного движения // Научный вестник Орловского юридического института МВД России имени В.В. Лукьянова .2023. № 1.С 40-49.

10. Горельчик М.Р. Искусственный интеллект в автомобильной индустрии: варианты использования машинного обучения для самоуправляемых транспортных средств // Исследования молодых ученых: материалы XIV Междунар. науч. конф. (г. Казань, ноябрь 2020 г.). Казань: Молодой ученый. 2020. С. 8-11.

УДК 624.011.2

СОЕДИНЕНИЯ НАГЕЛЬНОГО ТИПА ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ

Волик Алла Ричардовна, к.т.н., доцент, доцент кафедры архитектуры и строительства, **Алексеев Данила Денисович**, студент, **Орловский Артур Павлович**, студент

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы (г. Гродно, ул. Ожешко, д. 22, 230023, Республика Беларусь), a.volick@mail.ru

Аннотация. Наиболее распространенные цилиндрические нагели, применяемым для соединения элементов деревянных конструкций, металлические элементы, обладающие высокой прочностью, но имеющие недостатки, связанные с коррозионной стойкостью и весом. Представлены результаты экспериментальных исследований соединений нагельного типа деревянных элементов с использованием стержней металлической арматуры класса S500 и стеклопластиковой арматуры производства компании АРМАСТЕК с горизонтальным и вертикальным расположением. Исследования показали снижение несущей способности соединений на 21% – 29% и резкое увеличение деформаций сдвига на всех этапах нагружения при замене металлических нагелей, выполненных из арматуры класса S500, на

стеклопластиковую арматуру. Применение композитной стеклопластиковой арматуры возможно использовать в особых условиях (агрессивная среда, температурные воздействия и др.), где применение металла затруднено, но с учетом особенности работы ее в соединениях.
Ключевые слова: нагель, стеклопластиковая арматура, деформации сдвига, композитная арматура, разрушение.

CONNECTIONS OF THE NAGEL TYPE OF WOODEN ELEMENTS USING FIBERGLASS REINFORCEMENT

Volik Alla Richardovna, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Architecture and Construction, **Alekseev Danila Denisovich**, student, **Orlovski Artur Pavlovich**, student

Grodno State University named after Yanka Kupala (c.Grodno, Ozheshko St., d. 22, 230023, Republic of Belarus), a.volick@mail.ru

Abstract. The most common cylindrical dowels used to connect elements of wooden structures are metal elements that have high strength, but have disadvantages related to corrosion resistance and weight. The article presents the results of experimental studies of dowel-type connections of wooden elements using rods of class S500 metal reinforcement and fiberglass reinforcement manufactured by ARMASTEK with horizontal and vertical arrangement. The studies have shown a decrease in the bearing capacity of connections by 21% – 29% and a sharp increase in shear deformations at all stages of loading when replacing metal dowels made of class S500 reinforcement with fiberglass reinforcement. The use of composite fiberglass reinforcement can be used in special conditions (aggressive environment, temperature effects, etc.), where the use of metal is difficult, but taking into account the peculiarity of its operation in connections.
Keywords: dowel, fiberglass reinforcement, shear deformation, composite reinforcement, destruction.

Введение

Деревянные конструкции остаются востребованными в строительстве благодаря доступности материалов, простоте обработки, экологичности и долговечности при правильной эксплуатации. Однако надежность таких конструкций в значительной степени зависит от надежности соединений между элементами.

Одним из эффективных типов соединений являются нагельные, которые обеспечивают передачу усилий между элементами конструкции за счёт установки механических связей (нагелей), воспринимающих сдвиговые нагрузки [1,2]. По форме поперечного сечения известны цилиндрические и пластинчатые нагели. Пластинчатые нагели (деревянные, стальные и

пластмассовые вкладыши), размещенные в гнезда, служат для сплачивания деревянных элементов.

К цилиндрическим нагелям, применяемым для соединения элементов деревянных конструкций, наиболее распространены винты, болты, шпильки, гвозди и другие металлические стержни, обладающие высокой прочностью, но имеющие недостатки, связанные с коррозионной стойкостью и весом [3–6].

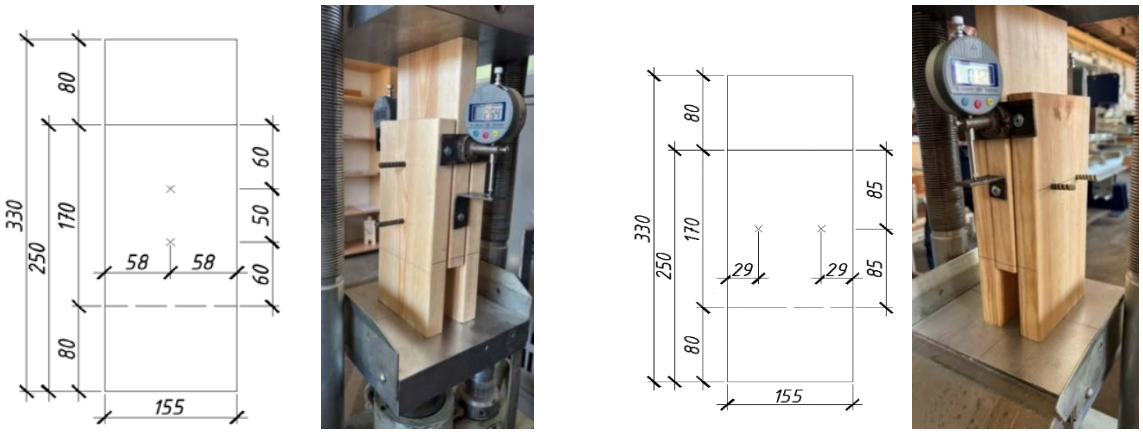
Для конструкций, подверженных действию агрессивных сред, в которых использование стальных нагелей недопустимо, в настоящий момент применяют нагели из высокопрочных пластиков (стеклопластики АГ-4С, АГ-4В, древеснослоистые пластики, текстолиты) [7].

В качестве альтернативы всё чаще рассматриваются и другие композитные материалы [8–10], в частности, стеклопластиковая арматура, обладающая рядом преимуществ – коррозионная стойкость, малый вес, хорошая адгезия к древесине и экономичность, но мало исследованная и недостаточно изученная.

Целью данной работы является оценка эффективности применения в качестве нагелей стеклопластиковой арматуры производства компании АРМАСТЕК.

Описание образцов и методики испытаний

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены образцы деревянных соединений нагельного типа. В качестве нагелей использовались стержни стеклопластиковой арматуры диаметром 6 мм производства компании АРМАСТЕК. С целью сравнения полученных данных были испытаны эталонные образцы соединений с нагелями, выполненными из металлических стержней Ø6 мм класса S500. Были изготовлены и испытаны соединения с двумя плоскостями среза с горизонтальным и вертикальным размещением нагелей (рис. 1). Все соединения имели одинаковую геометрию, что обеспечивало корректность сравнительного анализа.



а) OH2K6V / OH2S6V; б) OH2K6G / OH2S6G

Рис. 1. Конструктивное решение экспериментальных образцов нагельных соединений

Испытания проводились на гидравлической машине с торсионным силоизмерением ИП 6084-100-0. Для измерения деформаций сдвига в швах на образцах устанавливались два индикатора часового типа, которые были закреплены на крайних досках так, чтобы их штрихи упирались в уголки, привинченные к средней доске (см. рис. 1).

Анализ результатов экспериментальных исследований

Анализ разрушения экспериментальных образцов нагельных соединений показал (рис. 2):

✓ наибольшую несущую способность (разрушающая нагрузка составила 16,9 кН) продемонстрировал образец со стальной вертикальной арматурой OH2S6V. В случае вертикального размещения нагелей замена стальной арматуры на стеклопластиковую снижает разрушающую нагрузку на 29%.

✓ при горизонтальном размещении нагелей разрушающая нагрузка при стеклопластиковой арматуре OH2K6G составила 11,5 кН, что на 21% меньше образца OH2S6G с металлическим стержнем.

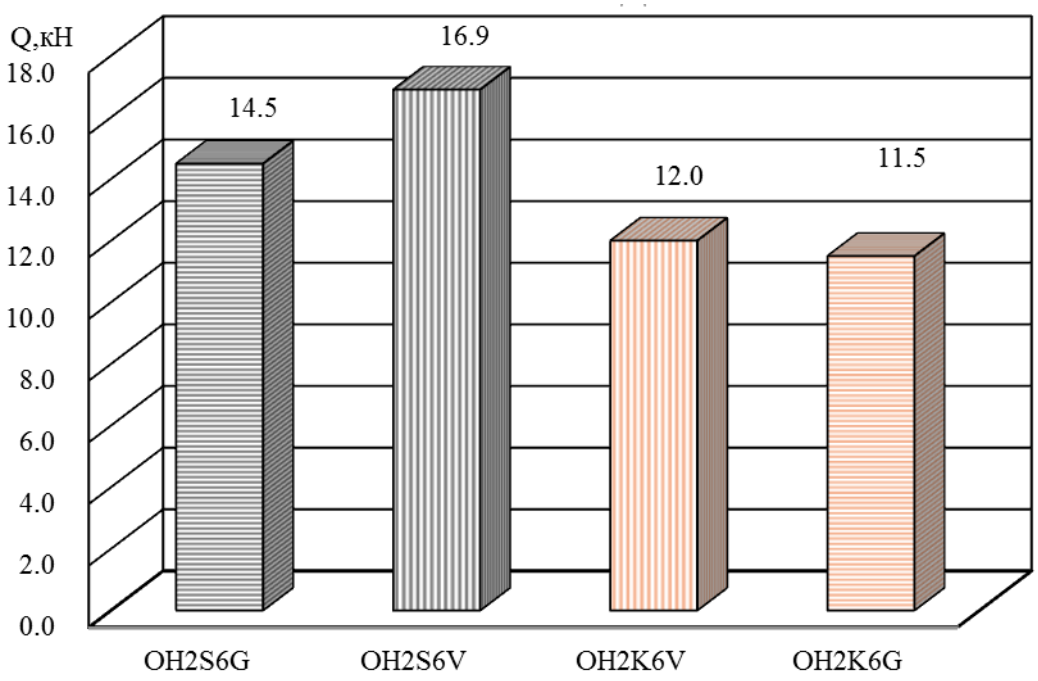


Рис. 2. Разрушающая нагрузка экспериментальных соединений

Анализ развития сдвига в экспериментальных нагельных соединениях показал:

— интенсивность развития деформаций сдвига в экспериментальных образцах не зависит от расположения нагелей;

— минимальные деформации сдвига на всех этапах нагружения показали образцы с нагелями, выполненными из металлической арматуры класса S500;

— при замене металлических нагелей на стеклопластиковую арматуры производства компании АРМАСТЕК развитие деформаций наблюдается более интенсивно с первых этапов нагружения и увеличивает деформации сдвига в 2 – 7 раз по мере нагружения образцов. Это может быть связано с меньшей жёсткостью и модулем упругости материала нагелей.

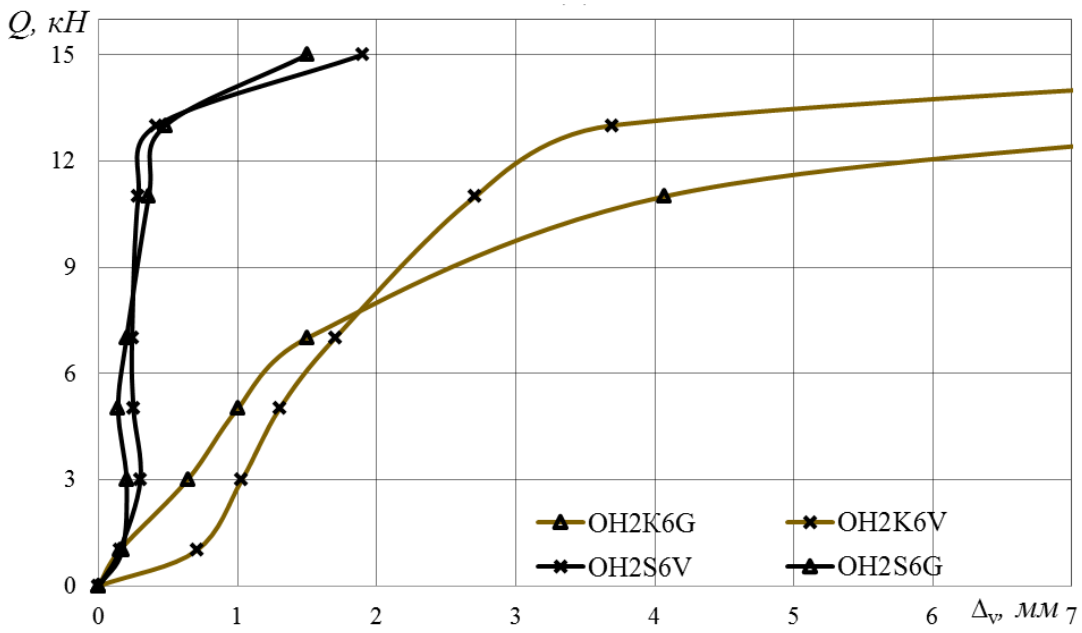


Рис. 3. Развитие деформаций сдвига в соединениях

Выводы

Выполненные экспериментальные исследования нагельных соединений позволили оценить эффективность использования композитных материалов (стеклопластиковой арматуры производства компании АРМАСТЕК) в качестве нагелей в соединениях. По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

✓ исследования показали снижение несущей способности соединений на 21% – 29% при замене металлических нагелей, выполненных из арматуры класса S500, на стеклопластиковую арматуру;

✓ применение стеклопластиковой арматуры в качестве нагелей вызывает интенсивное развитие деформаций сдвига на всех этапах нагружения;

✓ применение композитной арматуры (стеклопластиковой) возможно использовать в особых условиях (агрессивная среда, температурные воздействия и др.), где применение металла затруднено.

Список использованной литературы

1. Конструкции из дерева и пластмасс: учебное издание / Г.Н. Зубарев, Ф.А. Бойтемиров, В.М. Головина и др. - Москва: Академия, 2004 – 305 с.

2. Серов Е.Н. Проектирование деревянных конструкций / Серов Е.Н., Санников Ю.Д., Серов А.Е. – М.: АСВ, 2015. – 536 с.

3. Козлюк А.Г., Старовойтов С.А., Некипелов А.Д. Напряженно-деформированное состояние нагельного соединения // Сборник докладов III Международной научно-практической конференции к 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. – С. 64-68.

4. Окольникова Г.Э. Анализ работы нагельных соединений деревянных конструкций с позиций механики разрушения // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2011. – С. 40-46.

5. Исупов, С.А., Деревянные составные стержни на нагельных пластинах / С.А. Исупов // Общество, наука, инновации: сборн. материалов. – Киров, 2013. – № 2013. – С. 1578 – 1579.

6. Жилкин В.А. Исследование деформированного состояния цилиндрического нагеля в симметричном двухсрезном соединении пластин из древесины АПК России. 2015. Т. 71. – С. 29-41.

7. Умнова, О.В. Несущая и деформационная способность стеклопластиковых нагельных соединений в деревянных конструкциях с учетом времени и температуры эксплуатации: дисс. канд. техн. наук. – Воронеж, 2005. – 188 с.

8. Новицкий Я. Я. Механические свойства материалов усиленных деревянных балок / Я.Я. Новицкий // "Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства": сб. науч. ст. / ГрГУ им. Я. Купалы ; редкол.: А. Р. Волик (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2019.

9. Волик А. Р. Прочностные и деформационные характеристики стеклопластиковой арматуры, используемой в строительных конструкциях /А.Р. Волик, П.П. Каскенов // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : сб. науч. ст. X1X междунар. научн.-метод. семинара, Брест, 23-25 окт. 2014 г.- Брест : БрГТУ, 2014. – С. 32–36.

10. Барсуков В. Г. Сравнительный анализ возможных механизмов разрушения строительной композитной арматуры при разрыве / В. Г. Барсуков, А. Р. Волик, С. А. Сазон // Современные строительные материалы и технологии. Вып. 4 : сб. науч. ст. – Калининград : БФУ им. И. Канта, 2023. – С. 58-77.

УДК 624.011.17

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КЛЕЕНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ БАЛОК, УСИЛЕННЫХ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Волик Алла Ричардовна, к.т.н., доцент, доцент кафедры архитектуры и строительства, **Борель Арсений Александрович**, студент, **Цидик Евгений Иосифович,** студент

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы (г. Гродно, ул. Ожешко, д. 22, 230023, Республика Беларусь), a.volick@mail.ru

Аннотация. В настоящее время наблюдается рост использования методов усиления деревянных конструкций с использованием композитных материалов. В качестве армирующего элемента для деревянных конструкций применяют композитную арматуру, сетки, ленты, холсты и др. В статье представлены результаты экспериментальных исследований клееных деревянных балок, армированных в растянутой зоне стеклопластиковой арматурой производства компании АРМАСТЕК. Армирование стеклопластиковой арматурой способствует увеличению несущей способности деревянных балок до 47%. Армирование влияет на характер разрушения балок, поэтому для более эффективного использования необходимо совмещать армирование растянутой грани с усилением опорной части. Экспериментально установлено, что в балках, армированных стеклопластиковой арматурой, деформации в растянутой зоне меньше деформаций неармированной балки, возникающих при той же нагрузке.
Ключевые слова: усиление, армирование, деревянная балка, композитная арматура, разрушение.

EXPERIMENTAL STUDY OF GLUED WOODEN BEAMS REINFORCED WITH COMPOSITE MATERIALS

Volik Alla Richardovna, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Architecture and Construction**, Borel Arseniy Aleksandrovich,** student, **Tsidik Evgeniy Iosifovich,** student

Yanka Kupala State University of Grodno (Grodno, Ozheshko St., 22, 230023, Republic of Belarus), a.volick@mail.ru

Abstract. Currently, there is an increase in the use of methods for strengthening wooden structures using composite materials. Composite reinforcement, mesh, tapes, canvases, etc. are used as reinforcing elements for wooden structures. The article presents the results of experimental studies of glued wooden beams reinforced

in the tension zone with fiberglass reinforcement manufactured by ARMASTEK. Reinforcement with fiberglass reinforcement helps to increase the bearing capacity of wooden beams by up to 47%. Reinforcement affects the nature of beam failure, so for more efficient use it is necessary to combine reinforcement of the tension face with reinforcement of the supporting part. It has been experimentally established that in beams reinforced with fiberglass reinforcement, deformations in the tension zone are less than deformations of an unreinforced beam that occur under the same load.
Keywords: strengthening, reinforcement, wooden beam, composite reinforcement, destruction.

Введение

Традиционно одним из путей увеличения несущей способности деревянных конструкций является армирование поперечного сечения металлическими элементами. Это позволяет повысить несущую способность, жесткость и надежность деревянных конструкций, но приводит к ее удорожанию.

Сравнительно простым, эстетичным, щадящим конструкцию способом усиления деревянных конструкций является армирование композитными материалами. С развитием в 60-х годах XX века массового производства эпоксидных смол с высокими прочностными характеристиками наблюдается рост эффективности используемых методов реконструкции, ремонта и усиления деревянных конструкций с использованием композитных материалов [1–7]. Композитные материалы, полученные на основе синтетических смол, могут быть использованы как для усиления поперечного сечения конструкций, восстановления геометрии сечения, так и для соединения армирующего материала с усиляемым элементом [8–10].

Применение композитных материалов в Республике Беларусь для усиления деревянных конструкциях в настоящий момент ограничено отсутствием нормативной базы по применению композитных материалов.

Описание экспериментального исследования

Для определения эффективности усиления деревянных балок композитными материалами были проведены экспериментальные исследования изгибаемых деревянных балок, усиленных стеклопластиковой арматурой.

Образцы клееных деревянных балок выполнены сечением 40×80 мм длиной 1000 мм. В качестве армирующих элементов использовались стеклопластиковая арматура диаметром 6 мм производства компании АРМАСТЕК. Приклеивание армирующего элемента к деревянным балкам осуществлялось с помощью эпоксидного клея. С целью сравнения полученных данных был испытан эталонный образец балки без усиления растянутой зоны Б0 (рис. 1).

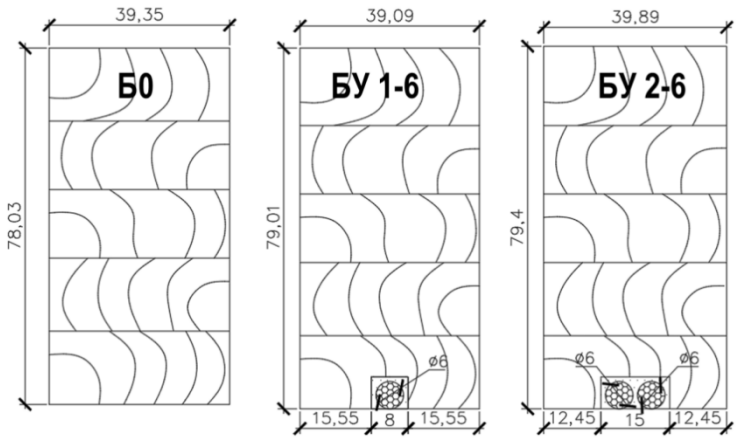


Рис. 1. Поперечные сечения опытных балок

Испытания проводились по балочной схеме до разрушения с приложением сосредоточенных усилий в третях пролета (рис. 2) на машине для испытаний на изгиб С091-02N. В процессе испытания при помощи тензорезисторов КФ 5П1-20-100-Б-12, расположенных на верхней и нижней гранях центральной части балки, были определены относительные деформации. Для измерения использовали измерительно-управляемое устройство УИУ 2002.



Рис. 2. Схема установки образца

Анализ результатов экспериментальных исследований

Разрушение неармированной эталонной балки Б0 произошло вследствие разрыва растянутых волокон древесины в центре пролета при нагрузке 18,06 кН. Армированные балки БУ1-6 и БУ2-6 разрушились в результате скалывания древесины при нагрузке 25,47 кН и 26,69 кН, соответственно (рис. 3). При этом отрыв, разрушения самой арматуры и клея не произошло.



Рис. 3. Характер разрушения опытных балок

Анализ величин разрушающей нагрузки опытных балок (рис. 4) показал, что армирование балок стеклопластиковой арматурой в растянутой зоне увеличивает несущую способность от 41% до 47% в зависимости от процента армирования.

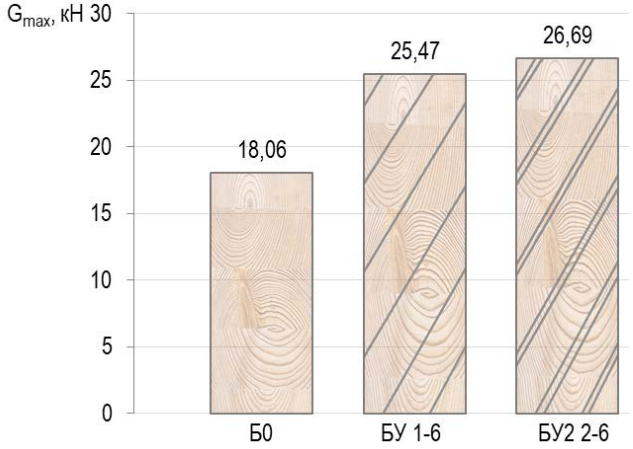


Рис. 4. Разрушающая нагрузка опытных балок

Анализ развития деформаций сжатия на верхней грани экспериментальных балок (рис. 5) показал, что интенсивность развития деформаций линейная вплоть до разрушения во всех балках. Более интенсивно развиваются деформации в балке БУ 2-6 и превышают деформации эталонной балки до 17%, в балке БУ 1-6, наоборот, меньше на 15 – 17 %.

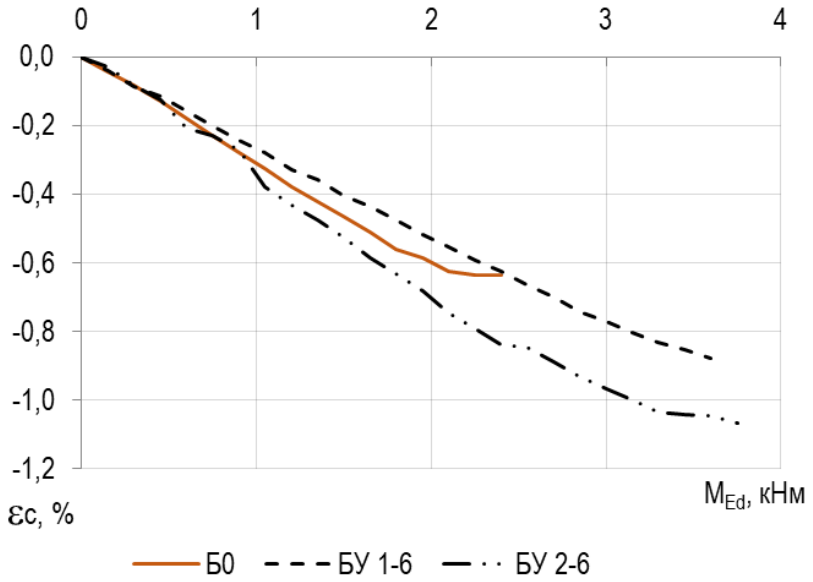


Рис. 5. Развитие деформаций на сжатой грани экспериментальных балок

Анализ напряженно-деформированного состояния растянутых волокон древесины показал (рис. 6), что деформации всех образцов, в том числе и эталонной балки Б0, развиваются практически линейно с одинаковой интенсивностью, и меньше на всех этапах нагружения значения деформаций неармированной балки Б0 на величину 3% – 20% по мере нагружения образцов.

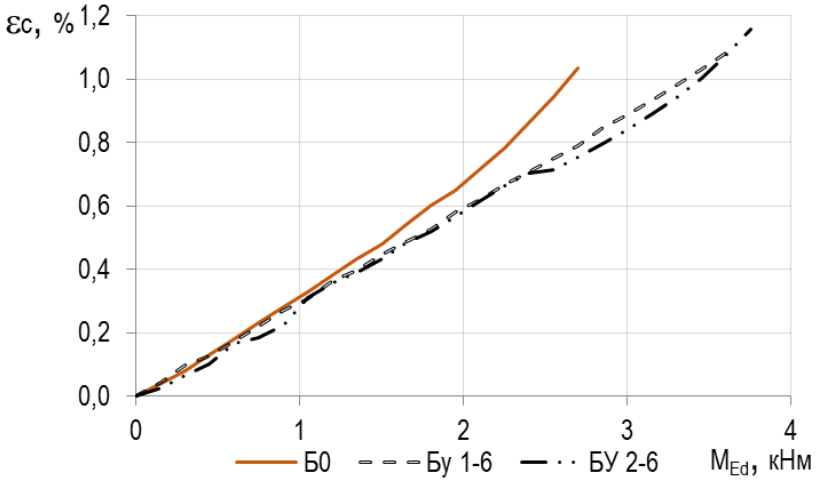


Рис. 6. Развитие деформаций на растянутой грани балок

Выводы

Выполненные экспериментальные исследования клеедеревянных балок позволили решить важную прикладную задачу по эффективному использованию композитных материалов (стеклопластиковой арматуры производства компании АРМАСТЕК) в качестве рабочей арматуры в изгибаемых деревянных балках. По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

✓ исследования показали возможность использования стеклопластиковой арматуры в качестве рабочей в изгибаемых клеедеревянных балках. Армирование стеклопластиковой арматурой способствует увеличению несущей способности балок до 47%;

✓ армирование влияет на характер разрушения балок, поэтому для более эффективного использования необходимо совмещать армирование растянутой грани с усилением опорной части;

✓ экспериментально установлено, что в балках, армированных стеклопластиковой арматурой, деформации в растянутой зоне меньше деформаций неармированной балки, возникающих при той же нагрузке.

Список использованной литературы

1. Cruz H., Custodio J., Smedley D. Bond repair of cracked beams. High Performance Structures and Materials. III WIT Transactions on The Built Environment, Vol 85, WIT Press 2006. – P. 89–95.

2. Волик А. Р., Цветинский И. И., Работа армированных клееных балок с различными материалами армирования и их расположением // Вестник Полоцкого государственного университета. №9. – 2006. – С. 21–26.

3. Radford D.W., Van Goethem D., Gutkowski R. M., Peterson M. L.: Composite repair of timber structures. Construction and Building Materials Volume: 16, October, 2002. – P. 417–425.

4. Jasieńko J.: Połączenia klejowe i inżynierskie w naprawie, konserwacji i wzmacnianiu zabytkowych konstrukcji drewnianych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2003. – 112 p.

5. Джангиров П. В. Эффективность усиления деревянных балок композитными материалами в растянутой зоне / П. В. Джангиров; науч. рук. А. Р. Волик // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства: сборник научных статей / Учреждение образования "Гродненский государственный университет имени Янки Купалы" ; главный редактор А. Р. Волик ; редколлегия: А. Р. Волик [и др.] ; рецензенты: А. А. Скаскевич, М. А. Селедцов. – Гродно : ГрГУ им. Янки Купалы, 2024. – С. 92–95.

6. Волик А. Р., Дунникова О. В. Работа деревянных элементов с усилением поперечного сечения композитными тканями // Перспективы развития строительного комплекса: материалы VIII Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов; Астрахань, 27-30 октября 2014 года / под общ. ред.: В.А. Гутмана, Д.Н. Ануфриева. – Астрахань: ГАОУ АО ВПО «АИСИ», 2014.– С. 329–335.

7. Волик А. Р. Композитные материалы, используемые для усиления деревянных конструкций /А.Р. Волик, О.В. Дунникова // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки

инженерных кадров : сб. науч. ст. X1X междунар. научн.-метод. семинара, Брест, 23-25 окт. 2014 г. – Брест : БрГТУ, 2014. – С. 29–32.

8. Барсуков В. Г. Сравнительный анализ возможных механизмов разрушения строительной композитной арматуры при разрыве / В. Г. Барсуков, А. Р. Волик, С. А. Сазон // Современные строительные материалы и технологии. Вып. 4 : сб. науч. ст. – Калининград : БФУ им. И. Канта, 2023. – С. 58–77.

9. Волик А. Р. Прочностные и деформационные характеристики стеклопластиковой арматуры, используемой в строительных конструкциях / А.Р. Волик, П.П. Каскенов // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : сб. науч. ст. X1X междунар. научн.-метод. семинара, Брест, 23-25 окт. 2014 г. – Брест : БрГТУ, 2014. – С. 32–36.

10. Новицкий Я. Я. Механические свойства материалов усиленных деревянных балок / Я.Я. Новицкий // "Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства": сб. науч. ст. / ГрГУ им. Я. Купалы; редкол.: А. Р. Волик (гл. ред.) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2019. – С. 114–117.

УДК 69.059.2

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОКРЫТИЯ ЗДАНИЯ СПОРТИВНОГО ЗАЛА 1963 ГОДА ПОСТРОЙКИ

Гоньшаков Александр Геннадьевич, к.э.н., доцент кафедры строительных конструкций, **Крячко Владислав Романович**, студент кафедры строительных конструкций, **Ощепкова Екатерина Сергеевна**, магистрант кафедры строительных конструкций

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), granit-proekt@mail.ru, korbid788@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного обследования покрытия здания спортивного зала, возведённого в 1963 году. Подробно описана конструктивная схема здания, включающая стропильные деревянные фермы треугольной конфигураций, а также текущее состояние кровельного покрытия. Проведены визуальные и инструментальные проверки прочности деревянных стропильных ферм, включающие оценку целостности древесины и качества узлов. С использованием метода конечных элементов выполнен

анализ несущей способности конструкций, который подтвердил их способность выдерживать современные нормативные нагрузки. Выявлены дефекты кровельного покрытия, включая сквозные разрушения и загнивание деревянного настила. На основе результатов обследования разработаны рекомендации по замене кровельного покрытия на современные материалы и полной замене деревянного настила для обеспечения долговечности, и безопасности эксплуатации здания.
Ключевые слова: обследование, покрытие здания, стропильная ферма, несущая способность, советская постройка, метод конечных элементов.

ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE COATING OF THE BUILDING OF THE SPORTS HALL BUILT IN 1963

Gonshakov Alexander Gennadievich, Cand.Sc., Associate Professor of the Department of Building Structures, **Kryachko Vladislav Romanovich**, Student, Department of Building Structures, **Oshchepkova Ekaterina Sergeevna**, Master's student at the Department of Building Structures

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), granit-proekt@mail.ru, korbid788@gmail.com

Abstract. The article presents the results of a comprehensive survey of the roofing of sports hall building, erected 1963. The structural scheme of the building, including triangular wooden trusses, as well as the current stste of the roofing, are described in detail. Visual and instrumental inspections of the strength of the wooden trusses were carried out, including an assessment of the integrity of the wooden and quality of the joints. Using the finite element method, an analysis of the bearing capacity of the structures was performed, which confirmed their ability to withstand modern normative loads. Defects of the roof covering were revealed, including through-destruction and rotting of the wooden flooring. Based on the results of the survey, recommendations were developed for replacing the roof covering with modern materials and completely replacing the wooden flooring to ensure the durability and safety of the building.
Keywords: survey, building envelope, truss, bearing capacity, soviet construction, finite element method.

Введение

Здание общественного назначения прямоугольной формы с габаритными размерами 29,9 х 10,75 м. Высота здания переменная, в зоне зала 7,9 м. Конструктивная схема здания – неполный каркас, с наружными несущими стенами. Пространственная жёсткость здания в целом обеспечивается совместной работой стен, перекрытий и фундаментов [1-3].

Несущими элементами покрытия здания в центральной части является стропильная деревянная ферма треугольной формы. При осмотре стропильной системы выявлено повсеместное повреждение биодеструкторами деревянных элементов. Неизменяемость покрытия в горизонтальной плоскости обеспечивается сплошным диском, образованным обрешеткой из досок. На основной части здания выполнена из досок 25х150мм, с шагом 0.5 … 0.52 м. Учитывая действующие нормативные снеговые нагрузки, сечение и шаг досок обрешетки достаточны для безопасной эксплуатации [4]. Покрытие кровли выполнено асбестоцементными листами по деревянному настилу из досок. При осмотре кровли выявлены места сквозного разрушения покрытия, деревянный настил имеет повсеместное загнивание и требует замены. Состояние кровли неудовлетворительное, местами аварийное.

Стропильная ферма в центральной части здания выполнена из дерева. Опиранием фермы служат наружные стены здания. Фермы выполнены пролётом 10,0 м и уложены с шагом 1,5…1,6 м. Пояса ферм в средней части выполнены из спаренных досок 150х50 мм. Раскосы выполнены из досок сечением 100х50 мм, стойки, так же приняты из брусков сечением 50х50 мм. Общий вид покрытия здания представлен на (рис. 1.)



Рис. 1. Общий вид фермы покрытия здания

Целью работы являлось определение состояния строительных конструкций покрытия здания, а также возможность реконструкции покрытия.

Методы

Проверка состояния древесины выполнялась в два этапа – визуально и инструментально. Визуально фиксировались: наличие трещин, поражение

биодеструкторами, отсутствие повреждений на материале основания вокруг места установки, наличие прогибов и деформаций.

Инструментально устанавливалась прочность на сжатие и растяжение древесины. Дефектов тела древесины, значительно влияющих на несущую способность, обнаружено не было. Вид узла сопряжения верхнего пояса стропильной фермы приведён на рис. 2.



Рис. 2. Узел сопряжения ВП стропильной фермы

Результаты и обсуждение

Несущая способность фермы с учётом новых нагрузок определялась методом конечных элементов в расчётной программе BASE. Существующие сечения элементов фермы с учётом прошедшего времени эксплуатации и состояния узлов соединения имеют достаточную несущую способность для восприятия действующих нагрузок. Результаты полученных усилий приведены на рис. 3.

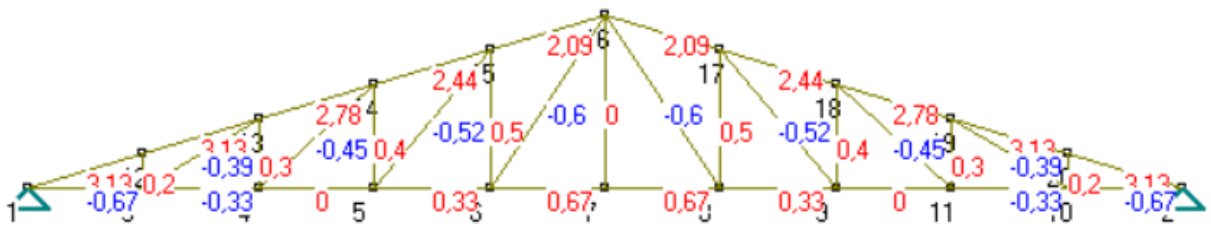


Рис. 3. Определение усилий в элементах фермы

На рисунке представлены внутренние усилия в элементах фермы. Полученные усилия в стержнях стропильной деревянной фермы меньше предельно допустимых, следовательно, на момент обследования стропильная система здания имеет работоспособное состояние.

Выводы

По техническому состоянию и конструктивному исполнению элементы покрытия на момент обследования, имеют работоспособное состояние. Фермы выполнены с достаточным запасом прочности под существующие нагрузки.

Список использованной литературы

1. Андриянов С. П. Ретроспективный анализ подходов к состоянию ограждающих конструкций для опасных производственных объектов // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16, № S4. DOI: EDN VAZRZI.

2. Крылова С. В. Реконструкция производственного здания в исторической застройке: Методические указания. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет ЭБС АСВ, 2015. 33 с.

3. Самойкина В. Н., Нифонтов А. В. Реконструкция производственного здания под торгово-офисный центр // Межвузовский сборник статей лауреатов конкурсов: Сборник статей. Выпуск 11. Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2009. С. 232-234.

4. Shishov I., Lisyatnikov M., Lukin M., Deev V., Prusov E., Chibrikin D., Roshcina S. Application of variable-height beams with wooden sub-rafter elements in the roof structures of industrial buildings. E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 460. Article No. 10046.

УДК 69.059.2

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЯ СПОРТИВНОГО ЗАЛА 60-х ГОДОВ ПОСТРОЙКИ

Гоньшаков Назар Геннадьевич, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций, **Крячко Владислав Романович**, студент кафедры строительных конструкций

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), granit-proekt@mail.ru, korbid788@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного обследования ограждающих конструкций здания спортивного зала, возведённого в 1963 году. Подробно описана конструктивная схема здания, включающая несущие наружные стены из полнотелого силикатного кирпича. Проведены визуальные и инструментальные поверки прочности стен, включающие проверку наличия трещин, выветривания кладки и ее намокания. С использованием метода конечных элементов выполнен анализ несущей способности конструкций, который подтвердил их способность выдерживать современные нормативные нагрузки. Выявлены многочисленные дефекты ограждающих конструкций, включая сквозные разрушения кирпичной кладки. На основе результатов обследования разработаны рекомендации по устранению трещин и устройству гидроизоляции для обеспечения долговечности, и безопасности эксплуатации здания.

Ключевые слова: реконструкция, ограждающие конструкции, несущие стены, несущая способность, советская постройка, метод конечных элементов.

TECHNICAL SURVEY OF THE ENCLOSING STRUCTURES OF A SPORTS HALL BUILDING BUILT IN THE 1960s

Gonshakov Alexander Gennadievich, Cand.Sc., Associate Professor of the Department of Building Structures, **Kryachko Vladislav Romanovich**, Student, Department of Building Structures.

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), granit-proekt@mail.ru, korbid788@gmail.com

Abstract. The article presents the results of a comprehensive survey of the enclosing structures of a sports hall building erected in 1963. The structural scheme of the

building, including load-bearing external walls made of soled silicate brick, is described in detail. Visual and instrumental inspections of wall strength were carried out, including checking for cracks, weathering of masonry and its wetting. The bearing capacity of the structures was analyzed using the finite element method, which confirmed their ability to withstand modern design loads. Numerous defects of the enclosing structures were identified, including through-destruction of the silicate brick. Based on the survey results, recommendations were developed for eliminating cracks and installing waterproofing to ensure the durability and operational safety of the building.
Keywords: survey, enclosing structures, load-bearing walls, bearing capacity, soviet construction, finite element method.

Введение

Здание общественного назначения прямоугольной формы с габаритными размерами 29,9 х 10,75 м. Высота здания переменная, в зоне зала 7,9 м. Конструктивная схема здания – неполный каркас, с наружными несущими стенами. Пространственная жёсткость здания в целом обеспечивается совместной работой стен, перекрытий и фундаментов [1, 2].

Несущими элементами здания являются несущие наружные стены из полнотелого силикатного кирпича на цементно-песчаном растворе. Внутренние стены и перегородки оштукатурены, толщина штукатурки 20-50 мм. При осмотре стен выявлено повсеместное нарушение целостности конструкции, трещины, сколы на фасаде.

Неизменяемость конструкции обеспечивается совместной работой фундамента, ограждающих конструкций и перекрытия. Наружные стены выполнены цепной кладкой из полнотелого силикатного кирпича толщиной 660 мм. Учитывая действующие нормативные нагрузки, толщина стены достаточна для безопасной эксплуатации.

При осмотре стен выявлены места трещин по фасаду здания, многочисленные места промочек по фасаду здания, горизонтальные сквозные трещины по наружным и внутренним стенам с шириной раскрытия от 1,0 до 22,0 мм, глубокое разрушение и вымывание раствора из кладки на глубину до 160 мм, а также зафиксированы участки биоповреждения, солевой коррозии. Состояние кровли неудовлетворительное, местами аварийное.

Общий вид стен здания представлен на (рис. 1, 2.)

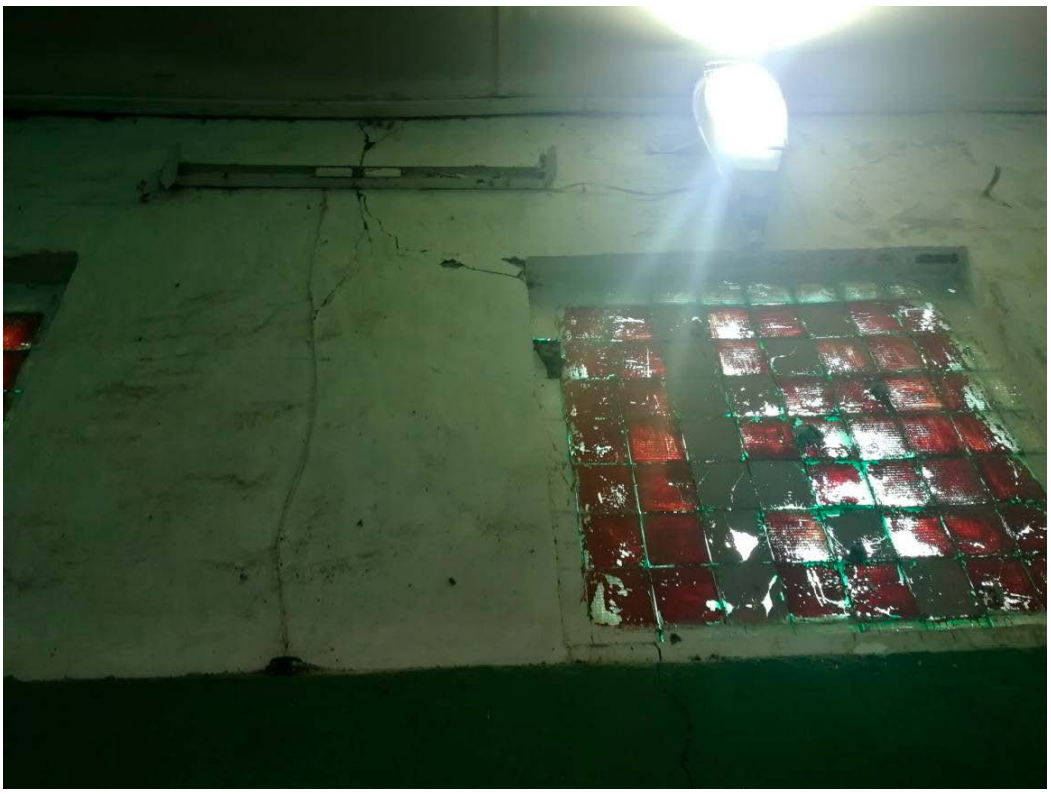


Рис. 1. Общий вид стен покрытия здания (вид изнутри здания)



Рис. 2. Общий вид стен покрытия здания (вид снаружи здания)

Целью работы являлось определение состояния строительных конструкций покрытия здания, а также возможность реконструкции наружных несущих стен.

Методы

Проверка состояния стен выполнялась визуально, при этом фиксировалось наличие трещин и других повреждений конструкции.

Вид сквозной трещины и промокания кладки в наружной кирпичной стене приведён на рис. 3.



Рис. 3. Вид сквозной трещины и промокания кладки в наружной кирпичной стене

Результаты и обсуждение

Несущая способность стен с учётом новых нагрузок определялась поверочным расчетом [3]. Существующие сечения стен с учётом прошедшего времени эксплуатации и состояния узлов соединения в местах без критичных повреждений имеют достаточную несущую способность для восприятия действующих нагрузок.

В местах повреждений следует выполнить ряд мероприятий по восстановлению кладки здания. Места выветривания кладки заполнить цементно-песчаным раствором. Поврежденные кирпичи заменить. В местах мелких трещин выполнить заделку раствором инъекционным методом. Этот метод позволяет восстановить целостность кладки и предотвращает дальнейшее распространение трещин.

В местах сильных повреждений может потребоваться частичная или полная замена кирпичной кладки. Этот метод обеспечивает максимальную надежность и долговечность конструкции. Следует предусмотреть замену перемычек оконных проемов на монолитные железобетонные. Все работы по

усилению конструкций производить в соответствии с СП 427.1325800.2018 «Каменные и армокаменные конструкции. Методы усиления».

Также нужно выполнить мероприятия по устройству гидроизоляции согласно СП 71.13330.2017 «Изоляционные и отделочные покрытия. Актуализированная редакция СНиП 3.04.01-87». В данном случае предложен вариант оштукатуривания фасада здания. Стоит предусмотреть устройство водоотвода с кровли, предназначенная для сбора и отвода дождевой и талой воды. Включает в себя водосточные желоба, водосточные трубы и другие элементы, которые обеспечивают эффективное удаление воды с крыши, предотвращая ее скопление и повреждения конструкций, промокание кирпичной кладки.

В целях обеспечения теплозащиты здания стоит предусмотреть устройство теплоизоляции здания по СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий». Предусмотреть устройство отмостки для защиты фундамента от атмосферных осадков согласно СП 82.13330.2016 «Благоустройство территорий».

Соблюдать регулярное обслуживание кладки, чтобы продлить срок службы конструкции и предотвратить появления дефектов. Регулярная очистка и покраска кладки как изнутри, так и снаружи, для защиты ограждающих конструкций от внешних воздействий. Периодический осмотр и контроль технического состояния кладки для своевременного выявления и устранения повреждений, позволит избежать серьезных проблем в будущем, а также соблюдений условий эксплуатации.

Выводы

По техническому состоянию и конструктивному исполнению элементы покрытия на момент обследования, имеют ограниченно-работоспособное состояние, местами аварийное. Предлагаемые методы устранения повреждения для нормальной эксплуатации: произвести усиление наружных и внутренних стен, произвести ремонт и перекладку наружных и внутренних стен в местах выветривания кирпичной кладки и раствора, выполнить утепление наружных кирпичных стен и перекрытия не соответствующих требованиям СП 131.13330.2021 Строительная климатология, выполнить устройство водоотвода с кровли здания.

Список использованной литературы

1. Андриянов С. П. Ретроспективный анализ подходов к состоянию ограждающих конструкций для опасных производственных объектов // Вестник Евразийской науки. 2024. Т. 16, № S4. EDN VAZRZI.

2. Крылова С. В. Реконструкция производственного здания в исторической застройке: Методические указания. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет ЭБС АСВ, 2015. 33 с.

3. Shishov I., Lisyatnikov M., Lukin M., Deev V., Prusov E., Chibrikin D., Roshcina S. Application of variable-height beams with wooden sub-rafter elements in the roof structures of industrial buildings. E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 460. Article No. 10046.

УДК 699.812.2

ОГНЕЗАЩИТНЫЕ РУЛОННЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Гравит Марина Викторовна[1], к.т.н., доцент, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, **Прусаков Василий Алексеевич**[2], технический директор, **Котлярская Ирина Леонидовна** [1*], м.н.с. лаб. защищенных и модульных сооружений

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29 литера Б, 195251, Российская Федерация), marina.gravit@mail.ru, *iravassilek@mail.ru

[2] ООО «Научно-производственный комплекс «ПРОМИЗОЛ» (г. Москва, ул. Барклая, д.6, стр.3, 121087, Российская Федерация), info@tdpromizol.com

Аннотация. Представлено исследование огнезащитной эффективности рулонного композитного материала «ПРОМИЗОЛ-СТК-МЕТ-1,0» при воздействии высоких температур на стальные конструкции. Целью работы являлось определение времени достижения предельного состояния стальной двутавровой колонны (500 °С). Испытания проводились на образцах с однослойным и двухслойным покрытием. Результаты показали, что огнезащитная эффективность однослойного покрытия составила 18 минут, что соответствует 7 группе огнезащитной эффективности. Двухслойное покрытие обеспечило огнезащитную эффективность в 47 минут, что соответствует 5 группе огнезащитной эффективности.

Ключевые слова: огонь; пожарная безопасность; композитные материалы; многослойные материалы.

FIREPROOF ROLL COMPOSITE COATINGS

Gravit Marina Viktorovna[1], PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, **Prusakov Vasily Alekseevich**[2], technical director, **Kotlyarskaya Irina Leonidovna** [1*], junior researcher of the Laboratory of Protected and Modular Structures

[1] Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, vn. ter. g. municipal district Akademicheskoe, st. Polytechnicheskaya, 29 lit. B, 195251, Russian Federation), marina.gravit@mail.ru, *iravassilek@mail.ru
[2] Scientific and Production Complex PROMIZOL LLC (Moscow, Barklaya St., 6, building 3, 121087, Russian Federation), info@tdpromizol.com

Abstract. The article presents a study of the fire protection efficiency of the rolled composite material "PROMIZOL-STK-MET-1.0" when exposed to high temperatures on steel structures. The aim of the work was to determine the time to reach the limit state of a steel I-beam column (500 °C). The tests were carried out on samples with a single-layer and double-layer coating. The results showed that the fire protection efficiency of the single-layer coating was 18 minutes, which corresponds to the 7th group of fire protection efficiency. The double-layer coating provided a fire protection efficiency of 47 minutes, which corresponds to the 5th group of fire protection efficiency.
Keywords: fire; fire safety; composite materials; multilayer materials.

Введение

Воздействие высоких температур и открытого пламени приводит к разрушению строительных конструкций, повреждению инженерных систем и уничтожению материальных ценностей. При проектировании, возведении и эксплуатации зданий необходимо предусматривать полный комплекс противопожарных мероприятий. Соблюдение нормативных требований пожарной безопасности в зданиях достигается посредством комплексного применения активных и пассивных противопожарных мер [1]. Системы активной противопожарной защиты (автоматические установки пожаротушения, пожарная сигнализация, системы дымоудаления и т. д.) предназначены для обнаружения и контроля или тушения пожара на его начальной стадии [2,3]. Пассивные меры противопожарной защиты в свою очередь, представляют собой конструктивные решения и материалы, направленные на обеспечение устойчивости здания во время воздействия огня и сдерживания его распространения (огнестойкие стены, перекрытия и двери). Основная задача системы пассивной огнезащиты состоит в обеспечении необходимого временного интервала для ликвидации очагов возгорания и проведения эвакуационных мероприятий., а также минимизации денежных потерь [4,5].

Огнезащитные композитные рулонные покрытия представляют собой один из наиболее практичных, доступных по стоимости и действенных методов обеспечения безопасности строительных элементов от разрушительного воздействия огня [6,7]. Они изготавливаются на основе различных компонентов, включая минеральные волокна, вспученные вермикулиты [8], графит [9] и специальные полимерные связующие [10], обеспечивающие адгезию к защищаемой поверхности. Огнезащитные и

огнестойкие покрытия обеспечивают огнезащитный слой на поверхностях горючих и негорючих материалов, не изменяя при этом их внутренние свойства [11].

Целью данного исследования было экспериментальное огневое испытание гибкого эластичного огнезащитного материала «ПРОМИЗОЛ - СТК-МЕТ-1,0».

Методы

Огневые испытания проводились на стальных колоннах двутаврового профиля №20 (приведенная толщина металла 3,4 мм) при стандартных условиях теплового воздействия. Исследование велось с учетом требований Федерального закона №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» и ГОСТ Р 53295-2009 «Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности».

Суть данного метода заключается в определении огнезащитной эффективности материала. Это достигается путем воздействия тепла на образец и измерения временного интервала от начала нагрева до момента, когда образец достигает предельного состояния. Предельным состоянием считается момент, когда температура металла в опытном образце достигает критической отметки в 500 °С. Данная температура определяется как среднее значение, полученное на основании показаний трех термопар, установленных на образце.

На поверхность стальных колонн было нанесено огнезащитное покрытие в следующем составе:

- образцы №1 и №2 – огнезащитная сетка «ПРОМИЗОЛ -СТК-МЕТ-1,0» в 1 слой;
- образцы №3 и №4 – огнезащитная сетка «ПРОМИЗОЛ -СТК-МЕТ-1,0» в 2 слоя.

Результаты и обсуждение

В процессе проведения испытаний состояние образцов оценивалось визуально и фиксировалось текстуально. На рис.1 показан один из испытуемых образцов до и после испытания.



Рис. 1. Огневое испытание: защищаемый от огня двутавр (слева), двутавр с огнезащитой (в центре), испытуемый образец после воздействия огня (справа)

Результаты представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Сводные результаты испытаний

Наименование контролируемого параметра	Значение параметра				
	По ГОСТ	Фактически на образцах			
		№1	№2	№3	№4
Температурный режим в огневой камере	$T - T_0 = 345 \lg(8t + 1)$	В норме			
Продолжительность проведения испытаний		20 мин		49 мин	
Предельное состояние	Достижение критической температуры стали образца, равной 500°С	17 мин.	19 мин.	46 мин.	48 мин.

Выводы

Результаты испытаний огнезащитной сетки «ПРОМИЗОЛ -СТК-МЕТ-1,0» толщиной в 1 слой и в 2 слоя, нанесенной на двутавровую балку №20 с приведенной толщиной металла 3,4 мм и высотой 1700мм, составили:

- при толщине в 1 слой – на образце №1 – 17 мин., на образце №2 – 19 мин. Огнезащитная эффективность составляет 18 мин (7 группа огнезащитной эффективности);

- при толщине в 2 слоя – на образце №3 – 46 мин., на образце №4 – 48 мин. Огнезащитная эффективность составляет 47 мин (5 группа огнезащитной эффективности).

Список использованной литературы

1. Gravit, M., Kotlyarskaya, I., Abdulova, D. Non-combustible composite materials for fire curtains: thermal analysis and microscopy // Magazine of Civil Engineering. 2024. Vol. 127, 12705–12705. DOI: 10.34910/MCE.127.5.

2. Wi, S., Kim, Y.U., Choi, J.Y., Shin, B., Kim, S. Active protection against fire: Enhancing the flame retardancy of sandwich panels using an expandable graphite layer formation // International Journal of Thermal Sciences. 2024. Vol. 195. P. 108658. DOI: 10.1016/J.IJTHERMALSCI.2023.108658.

3. Bøe, A.S., Hox, K., Mikalsen, R.F., Friquin, K.L. Large-scale fire experiments in a cross-laminated timber compartment with an adjacent corridor – Partly and fully protected with a water sprinkler system // Fire Safety Journal. 2024. Vol. 148. P. 104212. DOI: 10.1016/J.FIRESAF.2024.104212.

4. Cui, W., Zhu, Y., Ni, Y., Wei, X., Zhou, F., Jia, K., Xu, B. Study on the thermal response and key parameters for passive fire protection of bridge cables under different fire conditions // Engineering Structures. 2025. Vol. 340. P. 120737. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2025.120737.

5. Covi, P., Tondini, N., Lamperti Tornaghi, M., Molina, F.J., Pegon, P., Tsionis, G. Seismic experimental analysis of a full-scale steel building with passive fire protections // Engineering Structures. 2024. Vol. 300. P. 117203. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2023.117203.

6. Weil, E.D. Fire-protective and flame-retardant coatings - A state-of-the-art review // Journal of Fire Sciences. 2011. Vol. 29. Pp. 259–296. DOI: 10.1177/0734904110395469.

7. Soares, I., Ferreira, J.L., Silva, H. и Rodrigues, M.P. Fire-retardant and fire-resistant coatings: From industry to the potential use on cultural heritage // Journal of Cultural Heritage. 2024. Vol. 68. Pp. 316–327. DOI: 10.1016/J.CULHER.2024.06.014.

8. Mariappan, T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review // Journal of Fire Sciences. 2016. Vol. 34. Pp. 120–163. DOI: 10.1177/0734904115626720.

9. Wang, Z., Han, E., Ke, W. Influence of expandable graphite on fire resistance and water resistance of flame-retardant coatings // Corrosion Science. 2007. Vol. 49. Pp. 2237–2253. DOI: 10.1016/J.CORSCI.2006.10.024.

10. Liang, S., Neisius, N.M., Gaan, S. Recent developments in flame retardant polymeric coatings // Progress in Organic Coatings. 2013. Vol. 76. Pp. 1642–1665. DOI: 10.1016/J.PORGCOAT.2013.07.014.

11. Yasir, M., Ahmad, F., Yusoff, Puteri Sri Melor Megat Ullah, S., Jimenez, M. Latest trends for structural steel protection by using intumescent fire protective coatings: a review // Surface Engineering. 2020. Vol. 36. Pp. 334–363. DOI: 10.1080/02670844.2019.1636536

УДК: 620.92

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОЭТАЖНОГО ЖИЛОГО ЗДАНИЯ

Давиденко Мэри Арменовна[1], студент ИАСЭ, **Давиденко Никита Алексеевич**[2], студент ИАСЭ, **Репин Владимир Анатольевич**, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), [1] 2002-mary@mail.ru, [2] dawidenko.nirita2016@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные методы повышения энергоэффективности многоэтажных жилых зданий, направленные на снижение энергопотребления и минимизацию тепловых потерь. Особое внимание уделяется комплексному подходу, включающему модернизацию ограждающих конструкций, оптимизацию инженерных систем, внедрение возобновляемых источников энергии и интеллектуальных систем управления. Анализируются современные теплоизоляционные материалы (минеральная вата, пенополистирол, ЭППС) и их эффективность в различных конструктивных решениях. Рассматриваются преимущества замены оконных блоков на энергоэффективные стеклопакеты с низкоэмиссионным покрытием. Исследуются перспективные технологии в области систем отопления, включая индивидуальные тепловые пункты, тепловые насосы и рекуперацию тепла в вентиляционных системах. Отдельный раздел посвящен использованию альтернативной энергетики (солнечные коллекторы, фотоэлектрические системы) и их интеграции в архитектуру зданий. Освещаются вопросы автоматизации учета и управления энергопотреблением через системы "умный дом" и BMS. Приводятся экономические расчеты окупаемости энергосберегающих мероприятий и данные по реальной эффективности различных решений на примере российских и зарубежных проектов. Статья основана на актуальных научных исследованиях и практическом опыте внедрения энергоэффективных технологий в строительстве.

Ключевые слова: энергоэффективность, теплоизоляция, рекуперация тепла, возобновляемая энергетика, интеллектуальные системы, тепловые насосы, многоэтажные здания.

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF A MULTI-STOREY RESIDENTIAL BUILDING

Davidenko Mary Armenovna[1], student of IASE, **Davidenko Nikita Alekseevich**[2], student of IASE, **Repin Vladimir Anatolevich**, PhD, Associate Professor of the Department of Building Structures

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletov
(Vladimir, Gorky St., 87, 600000, Russian Federation),
[1] 2002-mary@mail.ru [2] dawidenko.nirita2016@yandex.ru

Abstract. The article examines current methods for improving the energy efficiency of multi-story residential buildings, aimed at reducing energy consumption and minimizing heat loss. Special attention is paid to an integrated approach, including the modernization of building envelopes, optimization of engineering systems, the introduction of renewable energy sources, and smart control systems. Modern thermal insulation materials (mineral wool, expanded polystyrene, XPS) and their effectiveness in various structural solutions are analyzed. The advantages of replacing window units with energy-efficient double-glazed windows featuring low-emissivity coatings are considered. Promising technologies in heating systems are explored, including individual heat points, heat pumps, and heat recovery in ventilation systems. A separate section is devoted to the use of alternative energy (solar collectors, photovoltaic systems) and their integration into building architecture. Issues of energy consumption monitoring and management automation through smart home and BMS systems are highlighted. The article provides economic calculations on the payback period of energy-saving measures and data on the real-world effectiveness of various solutions, using examples from Russian and international projects. The research is based on current scientific studies and practical experience in implementing energy-efficient technologies in construction.
Keywords: energy efficiency, thermal insulation, heat recovery, renewable energy, smart systems, heat pumps, multi-story buildings.

Введение

В условиях глобального роста энергопотребления и ужесточения экологических требований проблема энергоэффективности зданий приобретает особую актуальность. По данным Международного энергетического агентства (IEA), на здания приходится около 40% мирового потребления энергии, при этом значительная часть ресурсов расходуется нерационально из-за устаревших строительных норм и технологий [1]. В России, где климатические условия требуют интенсивного отопления в течение большей части года, вопрос энергосбережения в жилом секторе стоит особенно остро.

Многоэтажные жилые здания представляют собой сложные инженерные системы, в которых потери тепла происходят через ограждающие

конструкции, вентиляцию, неэффективные системы отопления и электроснабжения (рис. 1). Снижение энергопотребления в таких зданиях не только уменьшает эксплуатационные расходы, но и способствует выполнению международных обязательств по сокращению выбросов парниковых газов.

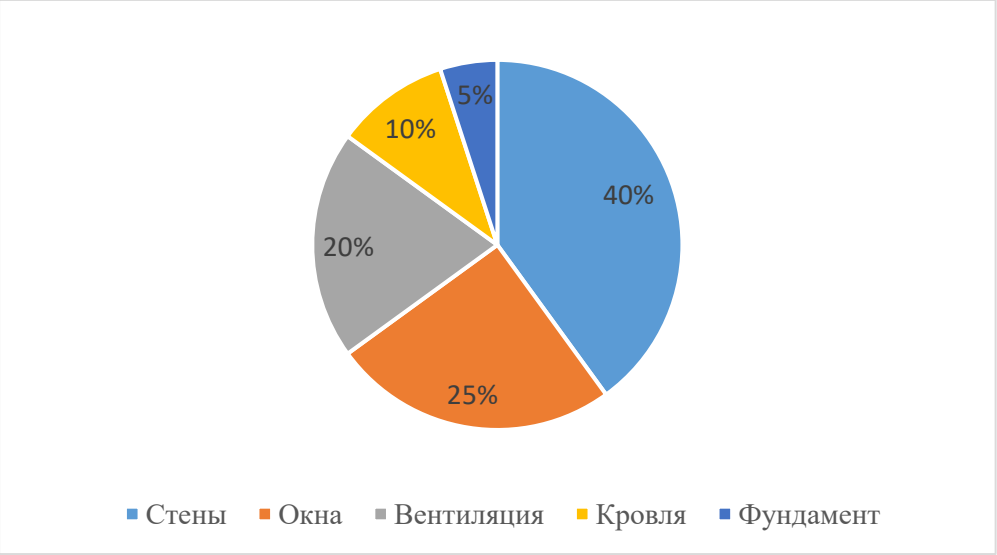


Рис. 1. Распределение теплопотерь в типовом жилом доме

Цель данной статьи – комплексный анализ современных методов повышения энергоэффективности многоэтажных жилых зданий. В работе рассматриваются как проверенные решения (утепление фасадов, замена окон), так и инновационные подходы (использование возобновляемых источников энергии, "умные" системы управления). Особое внимание уделяется экономической целесообразности различных технологий и их влиянию на экологию.

Теплоизоляция ограждающих конструкций

Теплопотери через наружные стены, кровлю, окна и фундамент составляют основную часть нерационального энергопотребления в жилых зданиях. Согласно исследованиям, проведенным НИИ строительной физики, через неутепленные стены панельных домов советской постройки теряется до 40% тепла, а через старые деревянные окна – еще 20-25% [2]. Эти цифры наглядно демонстрируют, почему модернизация ограждающих конструкций должна быть первоочередной задачей при повышении энергоэффективности.

Современный рынок строительных материалов предлагает широкий выбор теплоизоляционных решений (табл. 1). Одним из наиболее популярных материалов остается минеральная вата, которая сочетает хорошие теплоизоляционные свойства (λ=0,035-0,042 Вт/(м·К)) с негорючестью и паропроницаемостью. Однако, как отмечает профессор А.В. Савин в своей работе "Энергосберегающие технологии в строительстве", при монтаже

минераловатных плит необходимо строго соблюдать технологию, чтобы избежать образования мостиков холода [3].

Таблица 1. Сравнительные характеристики теплоизоляционных материалов

Материал	Теплопроводность (Вт/м·К)	Паропроницаемость (мг/м·ч·Па)	Горючесть	Срок службы (лет)
Минвата	0,035-0,042	0,3-0,6	НГ	25-50
ППС	0,028-0,034	0,05	Г4	15-20
ЭППС	0,028-0,033	0,015	Г4	30-40

Альтернативой минеральной вате выступают полимерные утеплители – пенополистирол (ППС) и экструдированный пенополистирол (ЭППС). Последний, благодаря закрытой ячеистой структуре, обладает практически нулевым водопоглощением, что делает его идеальным выбором для утепления цокольных этажей и фундаментов. Однако, как справедливо указывает С.П. Коробков в "Справочнике по строительной теплофизике", при использовании пенополистиролов необходимо учитывать их горючесть и предусматривать противопожарные рассечки [4].

Особое внимание при модернизации зданий уделяется светопрозрачным конструкциям. Замена старых окон на современные стеклопакеты с низкоэмиссионным покрытием (i-стекло) и заполнением аргоном позволяет снизить теплопотери через окна в 2-3 раза. При этом, как показали исследования, проведенные в МГСУ, оптимальным с точки зрения энергоэффективности и стоимости является двухкамерный стеклопакет с одной низкоэмиссионной пленкой [5].

Совершенствование систем отопления и вентиляции

Традиционные для России системы центрального отопления, разработанные еще в советский период, сегодня демонстрируют крайне низкую эффективность. По данным ЖКХ-эксперта В.Р. Крюкова, потери тепла в магистральных сетях могут достигать 30%, а отсутствие индивидуального регулирования приводит к перетопу помещений и нерациональному расходу энергии [6].

Решением этой проблемы становится внедрение индивидуальных тепловых пунктов (ИТП) с автоматической погодозависимой регулировкой (табл. 2). Как показала практика эксплуатации в жилом комплексе "Экогород" в Москве, такие системы позволяют экономить до 25% тепловой энергии по сравнению с традиционной централизованной системой [7].

Перспективным направлением является использование тепловых насосов. Хотя в условиях российского климата их эффективность вызывает споры, исследования, проведенные НИИСФ РААСН, показывают, что грунтовые тепловые насосы могут обеспечить до 60% потребности здания в тепле даже при температурах ниже -20°С [8].

Таблица 2. Сравнение систем отопления

Параметр	**Центральное**	**ИТП**	**Тепловой насос**
КПД	60-70%	85-90%	300-400%
Срок службы	25 лет	30 лет	20 лет
Экологичность	Низкая	Средняя	Высокая

Вентиляционные системы – еще один важный источник теплопотерь. Принудительная вентиляция с рекуперацией тепла позволяет возвращать до 70% тепловой энергии, что подтверждается данными испытаний, проведенных в СПбГАСУ [9]. Особенно эффективны пластинчатые рекуператоры, КПД которых достигает 85% при правильном проектировании.

Использование возобновляемых источников энергии

Интеграция альтернативной энергетики в жилые здания – тренд последнего десятилетия. Наиболее распространенным решением стали солнечные коллекторы для горячего водоснабжения. Как отмечает эксперт по "зеленому" строительству А.Л. Мишин, в условиях средней полосы России 1 м² вакуумного коллектора может вырабатывать до 500 кВт·ч тепловой энергии в год, что достаточно для обеспечения 50-70% потребности в ГВС стандартной семьи [10].

Фотоэлектрические системы пока менее распространены в многоэтажном строительстве из-за высокой стоимости и малой площади крыш. Однако, как показывает опыт европейских стран, фасадные решения (BIPV) могут быть достаточно эффективны. По данным Fraunhofer ISE, современные тонкопленочные панели с КПД 15-18% позволяют генерировать до 100 кВт·ч с 1 м² в год даже в условиях Германии [11].

Умные системы управления энергопотреблением

Цифровизация жилищно-коммунального хозяйства открывает новые возможности для энергосбережения. Системы автоматизированного учета (АСКУЭ) позволяют не только фиксировать потребление, но и выявлять аномалии в режиме реального времени. Как показал эксперимент в Казани, внедрение "умных" счетчиков привело к снижению электропотребления на 12-15% за счет повышения дисциплины оплаты и выявления несанкционированных подключений [12].

Более сложные системы управления зданием (BMS) координируют работу всех инженерных систем. Датчики присутствия, светодиодное освещение с регулируемой яркостью, климат-контроль с учетом расписания – все эти решения в комплексе могут дать экономию до 30%, что подтверждается исследованиями компании Schneider Electric [13].

Архитектурно-планировочные решения

Энергоэффективность закладывается еще на стадии проектирования. Ориентация здания по сторонам света – классический прием: жилые комнаты лучше располагать на южной стороне, а вспомогательные помещения – на северной. Как доказали исследования архитектурной студии "Атриум", правильная ориентация может снизить энергопотребление на 8-10% без дополнительных затрат [14]. Важную роль играет компактность формы здания. Коэффициент компактности (отношение площади ограждающих конструкций к объему здания) должен быть минимальным. По данным НИИМосстроя, переход от башенной к секционной планировке снижает теплопотери через стены на 15-20% [15].

Выводы

Повышение энергоэффективности многоэтажных жилых зданий – сложная, но решаемая задача. Как показал анализ, наибольший эффект дает комплексный подход, сочетающий качественную теплоизоляцию ограждающих конструкций, модернизацию инженерных систем с внедрением рекуперации, использование возобновляемых источников энергии, внедрение интеллектуальных систем управления. Экономический эффект от таких мероприятий обычно окупается за 5-7 лет, а экологическая выгода проявляется сразу. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку новых композитных материалов с улучшенными теплоизоляционными свойствами и совершенствование систем аккумулирования энергии.

Таблица 3. Динамика окупаемости энергосберегающих мероприятий

Мероприятия	**Окупаемость**
Утепление фасада	5-7 лет
Замена окон	4-6 лет
Рекуперация	3-5 лет
Тепловой насос	8-12 лет

Список использованной литературы

1. International Energy Agency. World Energy Outlook 2022 // IEA Publications. 2022. № WEO-2022. P. 45-52. DOI: 10.1787/3a469094-en

2. НИИСФ РААСН. Отчет по исследованию теплопотерь жилых зданий. М., 2020. 48 с.

3. Савин А.В. Энергосберегающие технологии в строительстве // Жилищное строительство. 2019. № 8. С. 34-39. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-8-34-39.

4. Коробков С.П. Теплофизические характеристики материалов // Строительные материалы. 2018. № 6. С. 28-33. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-759-6-28-33.

5. МГСУ. Исследование энергоэффективности светопрозрачных конструкций. М., 2021. 36 с.
6. Крюков В.Р. Реформа ЖКХ: проблемы и решения // ЖКХ России. 2020. № 5. С. 8-15.
7. Отчет по эксплуатации ЖК "Экогород". М., 2021. 22 с.
8. НИИСФ РААСН. Тепловые насосы в условиях России. 2022. 48 с.
9. СПбГАСУ. Испытания вентиляционных систем. 2019.
10. Мишин А.Л. Зеленое строительство в России // Экология урбанизированных территорий. 2021. № 1. С. 25-31.
11. Fraunhofer ISE. Photovoltaics Report 2023 // ISE Publications. 2023. P. 12-18. DOI: 10.24406/ise-n-654321
12. Отчет о внедрении АСКУЭ в Казани. 2022.
13. Schneider Electric. Building Management Systems // SE Technical Reports. 2022. № BMS-WP-2022. P. 7-15.
14. Архитектурная студия "Атриум". Энергоэффективное проектирование. 2021.
15. НИИМосстрой. Планировочные решения жилых зданий. 2020.

УДК 691.32

ВЛИЯНИЕ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ДОБАВКИ НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ

Ильина Лилия Владимировна, д.т.н., профессор, директор института цифровых и инженерных технологий, **Вишняков Никита Сергеевич**, аспирант, **Шихалев Александр Евгеньевич**, магистрант

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин) (г. Новосибирск, ул. Ленинградская, д. 113, 630008, Российская Федерация), nsklika@mail.ru, vischniackov.nikita@yandex.ru, a.shikhalev@sibstrin.ru

Аннотация. В статье рассматривается влияние упрочняющей добавки на прочностные характеристики тяжелого и мелкозернистого бетонов на разных сроках набора прочности. Приведено описание используемых материалов, представлен ход и результаты эксперимента. Процент упрочнения на 1 сутки твердения, по сравнению с контрольными испытаниями, составил для тяжелого бетона 99 %, для мелкозернистого – 87 %, на 3 сутки – 48 % и 42 %, на 7 сутки – 52 % и 42 %, на 28 сутки – 70 % и 67 % соответственно. Так же отмечается увеличение удобоукладываемости бетонных смесей, определяемая

расплывом нормального конуса. Подвижность тяжелого бетона составила 740 мм, мелкозернистого бетона – 700 мм. Упрочняющая добавка состоит из трех компонентов: тонкодисперсные доломит (средний размер частиц 20 мкм) и диатомит (средний размер частиц 5 мкм), поликарбоксилатный суперпластификатор.
Ключевые слова: бетон, упрочняющая добавка, прочность, доломит, диатомит, цемент, суперпластификатор.

THE EFFECT OF A STRENGTHENING ADDITIVE ON THE STRENGTH OF CEMENT CONCRETES

Ilina Lilia Vladimirovna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Digital and Engineering Technologies, **Vishnyakov Nikita Sergeevich**, postgraduate student, **Shikhalev Alexander Evgenievich**, undergraduate

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin) (Novosibirsk, Leningradskaya str., 113, 630008, Russian Federation), nsklika@mail.ru, vischniackov.nikita@yandex.ru, a.shikhalev@sibstrin.ru

Abstract. The article examines the effect of a strengthening additive on the strength characteristics of heavy and fine-grained concrete at different strength gain periods. The description of the materials used is given, the course and results of the experiment are presented. The percentage of hardening on the 1st day of hardening, compared with control tests, was 99% for heavy concrete, 87% for fine–grained concrete, 48% and 42% on the 3rd day, 52% and 42% on the 7th day, 70% and 67% on the 28th day, respectively. There is also an increase in the workability of concrete mixes, determined by the spreading of the normal cone. The mobility of heavy concrete was 740 mm, fine–grained concrete – 700 mm. The strengthening additive consists of three components: finely dispersed dolomite (average particle size of 20 microns) and diatomite (average particle size of 5 microns), a polycarboxylate superplasticizer.
Keywords: concrete, reinforcing additive, strength, dolomite, diatomite, cement, superplasticizer.

Введение

Использование минеральных добавок в составе бетонной смеси представляет собой эффективный способ повышения прочностных характеристик бетона. Данный результат объясняется совместным действием нескольких факторов: с одной стороны, минеральные компоненты участвуют в процессе гидратации цемента, оптимизируя его; с другой стороны, если модуль упругости, используемых добавок выше, чем у цементного камня, то при воздействии внешних сил основная нагрузка распределяется на минеральные включения, что предохраняет цементную основу от разрушения.

Как итог, возникает синергия, благодаря которой цементный камень способен выдерживать увеличенные нагрузки [1-3].

Кроме повышения прочности, введение минеральных добавок оказывает положительное влияние на долговечность бетона. Тонкодисперсные частицы добавок, заполняя поры и микротрещины в структуре цементного камня, снижают его водопроницаемость, что значительно замедляет процессы коррозии арматуры и разрушения цементной матрицы, продлевая срок службы конструкции [4-7].

Выбор минеральной добавки определяется конкретными требованиями к бетону и условиями его эксплуатации. В данной работе в совместном действии используются две минеральные добавки – тонкодисперсные доломит (средний размер частиц 20 мкм) и диатомит (средний размер частиц 5 мкм).

Использование доломита объясняется его высокой прочностью и устойчивостью к воздействию агрессивных сред. Доломит, обладая высокой плотностью, способствует увеличению общей плотности цементного камня, что положительно сказывается на его морозостойкости и водонепроницаемости. Кроме того, доломит способен вступать в химические реакции с продуктами гидратации цемента, образуя дополнительные кристаллические фазы, укрепляющие структуру цементного камня вследствие закона подобия с клинкерными минералами [8-10].

Введение диатомита, направлено на улучшение реологических свойств бетонной смеси и повышение ее удобоукладываемости. Диатомит, благодаря своей пористой структуре и высокой удельной поверхности, способен удерживать воду, предотвращая ее преждевременное испарение и обеспечивая более полную гидратацию цемента. Кроме того, использованная дисперсная пуццолановая добавка (диатомит) способна снижать количество портландита, что приводит к повышению прочности бетона.

Совместное использование доломита и диатомита позволяет добиться комплексного улучшения свойств бетона. Доломит повышает прочность и долговечность, а диатомит улучшает удобоукладываемость и обеспечивает более полную гидратацию цемента. В результате получается бетон с улучшенными физико-механическими характеристиками, пригодный для использования в различных строительных конструкциях [11].

Цель работы – определение влияния упрочняющей добавки для цементных систем на прочность тяжелого и мелкозернистого бетона.

Материалы и методы исследования

В качестве вяжущего вещества использовался портландцемент класса ЦЕМ I прочностью 42,5, быстротвердеющий, производства кампании ООО «Сухоложск-цемент», Свердловская область, город Сухой Лог. Химический и минералогический состав портландцементного клинкера указан в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Химический состав портландцементного клинкера, %

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	$Na_2O + 0{,}658K_2O$	CI	Нерастворимый остаток
22,00	5,40	3,40	59,50	3,30	3,70	0,77	0,02	4,00

Таблица 2. Минералогический состав в % цементного клинкера

C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
62,5	15,6	6,4	10,3

Основные характеристики цемента представлены в таблице 3.

Таблица 3. Техническая характеристика портландцемента

№ п/п	Наименование показателя		Требуемое значение	Фактическое значение
1	Тонкость помола (остаток на сите №008), %		не нормируется	1,0
2	Удельная поверхность, $м^2/кг$		не нормируется	406
3	Сроки схватывания:	начало, мин конец, мин	не ранее 60 не нормируется	133 219
4	Нормальная густота, %		не нормируется	28,8
5	Прочность при изгибе: - в возрасте 2 суток, МПа - в возрасте 28 суток, МПа		 не нормируется не нормируется	 5,1 9,3
6	Прочность при сжатии: - в возрасте 2 суток, МПа - в возрасте 28 суток, МПа		 не менее 20,0 от 42,5 до 62,5	 27,3 57,2

В качестве мелкого заполнителя использовался кварцевый песок, производства кампании ООО «Старица», Новосибирская область, поселок Приобский. Характеристика песка и его зерновой состав приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4. Характеристика песка

Наименование месторождения	Насыпная плотность, $кг/м^3$	Модуль крупности	Класс песка	Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	Содержание глины в комках, %
Карьер «Кучино»	1550	2,21	I	1,5	0

Таблица 5. Зерновой состав используемого песка

Наименование показателей	Значения показателей					
Размер отверстий контрольных сит, мм	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16
Полные остатки на контрольных ситах А, % по массе	0	5,85	11,84	34,41	73,42	94,66

В качестве крупного заполнителя использовался щебень Шипуновского месторождения, Новосибирская область, город Искитим. Данный щебень имел фракцию 5-15 мм. Истинная плотность – 2690 $кг/м^3$, насыпанная плотность – 1370 $кг/м^3$. Характеристика крупного заполнителя и его зерновой состав приведены в таблицах 6 и 7.

Таблица 6. Характеристика щебня

Месторождение	Вид горной породы	Физико-технические показатели						
		Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	Содержание глины в комах, %	Лещадность, %	Содержание зерен слабых пород, %	Плотность кг/м^3	Насыпная плотность, кг/м^3	Морозостойкость, цикл
Шипуновское	Известняк	1	0	12,9	2	2690	1370	200

Таблица 7. Зерновой состав используемого щебня

Наименование показателей	Значения показателей				
Размер отверстий контрольных сит, мм	20	15	10	5	< 5
Полные остатки на контрольных ситах А, % по массе	0	1,99	49,58	99,19	100

В качестве минеральных добавок использовались: тонкодисперсные доломит и диатомит. Характеристики модификаторов приведены в таблицах 8 и 9.

Таблица 8. Характеристика тонкодисперсного доломита

Наименование показателей	Норма по ТУ	Фактические данные
Содержание доли суммы $CaCO_3$+$MgCO_3$, %, не менее	н.м. 98,0	99,26
Содержание доли $MgCO_3$, %, не более	н.б. 0,2	0,18
Массовая доля Fe_2O_3, %	н.б. 0,2	0,17
Массовая доля водорастворимых солей, %	н.б. 0,3	0,2
Массовая доля веществ не растворимых в 15% растворе соляной кислоты, %	н.б. 2,0	0,3
Массовая доля влаги, %	н.б. 0,5	0,2

Таблица 9. Характеристика тонкодисперсного диатомита

Наименование показателей		ТУ	Факт
Насыпная плотность, кг/м^3, не более		230	183
Массовая доля остатка на сите:	№ 01	0	0
(по ГОСТ 6613), %, не более	№ 0045	0	0
Массовая доля влаги, %, не более		5,0	3,2

Рн 10 % суспензии	6-8	7,0
Массовая доля потерь при прокаливании, %, не более	10,0	5,3
Удельная поверхность, $см^2/г$ (ПСХ)	30000±3000	30160
Массовая доля SiO_2, %, не менее	85	86,5
Массовая доля Al_2O_3, не более	7,0	6,8
Массовая доля Fe_2O_3, не более	3,0	2,9

В качестве химической добавки использовался поликарбоксилатный суперпластификатор (СП), производства кампании ООО «Полипласт» – Реламикс ПК, представленный в форме водного раствора. Характеристика модификатора приведена в таблице 10.

Таблица 10. Характеристика суперпластификатора

Наименование показателей	Значения показателей
Внешний вид	Жидкость светло-коричневого цвета
Плотность	$\geq 1{,}090$ г/см^3
Массовая доля сухого вещества	≥ 30 %
pH	5 - 7
Содержание хлоридов	$\leq 0{,}1$ %

Результаты и обсуждение

Работа заключается в определении влияния упрочняющей добавки для цементных систем на прочность тяжелого и мелкозернистого бетонов. Были проведены лабораторные испытания бетонных смесей. Изучались следующие характеристики: прочность при сжатии на 1-ые, 3-и, 7-ые и 28-ые сутки твердения в нормальных условиях, подвижность бетонной смеси, измеряемая расплывом нормального конуса. Исследуемые составы представлены в таблице 11.

Таблица 11. Исследуемые составы бетонных смесей

Состав	Содержание компонентов, масс. %						
	Цемент	Щебень	Песок	СП	Доломит	Диатомит	Вода
Тяжелый	19,1	39,9	32,2	0,2	0,6	1,5	6,5
Мелкозернистый	21,2	-	63,7	0,2	0,6	1,7	12,5

Результаты испытаний бетонных смесей приведены в таблице 12.

Таблица 12. Результаты испытаний

Состав	Показатель				
	Подвижность (РК), мм	Прочность при сжатии в возрасте, МПа:			
		1 сут.	3 сут.	7 сут.	28 сут.
Контрольный тяжелый	320	27,0	42,3	49,6	53,9
Модифицированный тяжелый	740	53,7	62,5	75,4	91,6
Контрольный мелкозернистый	410	20,9	36,6	45,3	49,9
Модифицированный мелкозернистый	700	39,0	51,8	64,4	83,1

Изучая полученные данные, видно, что модифицированные бетоны отличаются высокой подвижностью и повышенной прочностью. Расслоение отсутствует – это объясняется использованием тонкодисперсного доломита. Процент упрочнения на 1 сутки твердения, по сравнению с контрольными испытаниями, составил для тяжелого бетона 99%, для мелкозернистого – 87%, на 3 сутки – 48% и 42%, на 7 сутки – 52% и 42%, на 28 сутки – 70% и 67% соответственно.

Выводы

Использование упрочняющих добавок в составе бетонной смеси является эффективным и экономически выгодным способом улучшения свойств бетона. Правильный выбор и необходимая дозировка добавки позволяет повысить прочность, удобоукладываемость и долговечность бетона, что делает его незаменимым материалом в современном строительстве.

В работе разработаны составы модифицированных бетонов и доказана эффективность использования упрочняющей добавки для цементных смесей на основе: тонкодисперсных доломита и диатомита, поликарбоксилатного суперпластификатора.

Максимальная прочность в 28-ми дневном возрасте твердения у тяжелого бетона составила – 91,6 МПа, у мелкозернистого – 83,1 МПа.

Отмечено влияние модификатора на удобоукладываемость бетонных смесей. Подвижность, измеряемая расплывом нормального конуса, у тяжелого бетона после приготовления смеси равнялась 740 мм, у мелкозернистого – 700 мм. Расслоение в обоих случаях отсутствует.

Список использованной литературы

1. Изменение технологических свойств и прочностных характеристик высокоподвижного бетона введением комплексного модификатора / Л. В. Ильина, Г. И. Бердов, Н. С. Вишняков, Д. А. Цекарь // Строительные

материалы. – 2024. – № 1-2. – С. 15-21. – DOI 10.31659/0585-430X-2024-821-1-2-15-21.

2. Ильина, Л. В. Повышение физико-механических свойств высокоподвижного тяжелого бетона / Л. В. Ильина, И. Л. Чулкова, Н. С. Вишняков // Эксперт: теория и практика. – 2024. – № 2(25). – С. 18-23. – DOI 10.51608/26867818_2024_2_18.

3. Ильина, Л. В. Повышение прочности тяжелого бетона при использовании дисперсных минеральных добавок / Л. В. Ильина, Г. И. Бердов, Н. О. Гичко // Вестник ВСГУТУ. – 2023. – № 1(88). – С. 66-72. – DOI 10.53980/24131997_2023_1_66.

4. Ильина, Л. В. Упрочнение цемента путем ввода тонкодисперсных минеральных добавок / Л. В. Ильина, Н. О. Гичко, А. К. Туляганов // Цемент и его применение. – 2022. – № 3. – С. 52-55.

5. Высокоэффективные самоуплотняющиеся бетонные смеси и высокопрочные бетоны на их основе / В. Я. Соловьева, Ф. М. Шварц, И. В. Степанова, Д. В. Соловьев // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2019. – № 11(1023). – С. 48-50.

6. Садрашева, А. О. Влияние тонкодисперсных минеральных добавок на структуру и прочность цементного камня / А. О. Садрашева, А. В. Песоцкий // Ползуновский альманах. – 2016. – № 1. – С. 181-184.

7. Володин, В. В. Самоуплотняющиеся мелкозернистые бетоны с минеральными добавками на основе глинистых и карбонатных пород / В. В. Володин, Т. А. Низина // Эксперт: теория и практика. – 2023. – № 1(20). – С. 63-68. – DOI 10.51608/26867818_2023_1_63.

8. Несветаев, Г. В. Влияние некоторых минеральных добавок на свойства мелкозернистых бетонов и строительных растворов / Г. В. Несветаев, И. А. Животкова // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 5(113). – С. 388-402.

9. Исследование влияния суперпластифицирующих и минеральных добавок на свойства бетона / А. А. Шепитько, К. К. Серегин, М. А. Вербель, Л. М. Добшиц // Соискатель - приложение к журналу "Мир транспорта". – 2023. – № 3(14). – С. 39-43.

10. Эффекты микронаполняющих минеральных добавок в бетоне / А. Шарифов, А. А. Акрамов, У. Х. Умаров [и др.] // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2020. – № 1(49). – С. 150-154.

11. Езерский, В. А. Улучшение свойств мелкозернистого бетона с помощью комплексных минеральных добавок / В. А. Езерский, Н. В. Кузнецова, А. И. Дубровин // Строительные материалы. – 2015. – № 6. – С. 4-8.

УДК 691.32
67.09.33: Бетоны. Железобетон. Строительные растворы, смеси, составы

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СХВАТЫВАНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

Ильина Лилия Владимировна[1], доктор технических наук, профессор, директор института цифровых и инженерных технологий, **Цекарь Денис Анатольевич**[2], аспирант, **Колесников Павел Андреевич**[3]**,** студент

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)» (г. Новосибирск, Российская Федерация),
[1] nsklika@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8520-4453,
[2] tsekden@gmail.com, [3] pavel.kolesnikov.2004@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается влияние дисперсной минеральной добавки на основе кристаллогидратов портландцемента на процессы схватывания цементных систем. Проведен комплекс исследований, направленных на определение оптимального размера частиц и их влияние на скорость схватывания. Разработаны регрессионные модели, которые позволяют прогнозировать сроки схватывания в зависимости от количества добавки и продолжительности её помола. Полученные результаты могут быть использованы для создания рецептур модифицированных цементов с требуемыми свойствами.
Ключевые слова: дисперсные минеральные добавки, цементная матрица, ускорение схватывания, регрессионные модели, оптимизация помола.

MODELING OF THE SETTING PROCESSES OF CEMENT SYSTEMS

Ilina Lilia Vladimirovna[1], Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Digital and Engineering Technologies, **Denis Anatolyevich Tsekar**[2], postgraduate student, **Pavel Andreevich Kolesnikov**[3], student

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)" (Novosibirsk, Russian Federation), [1] nsklika@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8520-4453, [2] tsekden@gmail.com,
[3] pavel.kolesnikov.2004@mail.ru

Annotation. The article discusses the effect of a dispersed mineral additive based on Portland cement crystallohydrates on the setting processes of cement systems. A set of studies aimed at determining the optimal particle size and their effect on the

setting speed has been carried out. Regression models have been developed that make it possible to predict the setting time depending on the amount of the additive and the duration of its grinding. The results obtained can be used to create formulations of modified cements with the required properties.
Keywords: dispersed mineral additives, cement matrix, acceleration of setting, regression models, optimization of grinding.

Введение

Повышение эксплуатационных показателей цементных композитов и улучшение технологических свойств их сырьевых смесей является приоритетной задачей в технологии цементных систем. Данную задачу можно решить комплексно, путем совмещения химического взаимодействия с формированием межагрегатных связей клинкерных минералов и нано- и микродисперсных минеральных добавок [4-6, 8, 10, 12], которые способны существенно ускорить их процессы схватывания и твердения. При этом нано- и микродисперсные минеральные добавки, по мнению ряда ученых, могут изменять поровую структуру композита и являться упрочнителями и ускорителями твердения цементных систем [2-7, 11-14].

Для определения оптимальных параметров процессов схватывания и твердения модифицированных цементных систем необходимо их моделирование [1, 2, 9].

Целью настоящей работы явилось изучение влияния дисперсной минеральной добавки на основе кристаллогидратов портландцемента на свойства цементной матрицы, а также разработка моделей, позволяющих прогнозировать сроки схватывания в зависимости от различных факторов.

Методы и материалы

Вяжущим веществом в работе являлся портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ООО «Ачинский цемент» (г. Ачинск, Красноярский край), который имел следующий минеральный состав: $3CaO \cdot SiO_2$ – 67,0 %, $2CaO \cdot SiO_2$ – 11,0 %, $CaO \cdot Al_2O_3$ – 5,0 %, $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ – 13,0 %. Химический состав клинкера, по данным производителя (мас. %): CaO – 65,57; SiO_2 – 21,56; Al_2O_3 – 4,46; Fe_2O_3 – 4,30; MgO – 1,86; SO_3 – 0,65; п.п.п. – остальное.

В качестве суперпластификатора использовался поликарбоксилатный суперпластификатор «ПОЛИПЛАСТ ПК», представляющий собой сополимер на основе полиоксиэтиленовых производных ненасыщенных карбоновых кислот в сухой форме в виде порошка или гранул.

Процесс подготовки дисперсной минеральной добавки включал измельчение цементных кристаллогидратов в планетарной мельнице АГО-2. Продолжительность помола варьировалась от 30 секунд до 11 минут, после чего определялся средний размер частиц с помощью лазерного анализатора Shimadzu SALD-7500 nano. Далее данный тонкодисперсный порошок добавляли к цементу и тщательно перемешивали, после чего вливали воду и снова перемешивали. Для проведения экспериментальной части

использовался метод математического планирования эксперимента.

Экспериментальная часть

Помол добавки длился в течение 30, 45 секунд и от 1 до 11 минут. Результаты по влиянию длительности помола на диаметр частиц добавки приведены в таблице 1. При этом измельчение вручную осуществлялось до дисперсности, позволяющей пройти порошку через сито № 008.

Таблица 1. Влияние длительности помола на диаметр частиц добавки

Продолжительность помола (сек / мин)	**Диаметр частиц, мкм**
Измельчение вручную	45.30
30 с	17.44
45 с	13.01
60 с	5.87
2 мин	5.06
3 мин	3.57
5 мин	4.27
7 мин	4.32
9 мин	3.94
11 мин	3.77

Анализ экспериментальных данных показал нелинейную зависимость размера частиц от продолжительности помола. Из таблицы 1 видно, что максимальное уменьшение диаметра частиц (до 3.57 мкм) наблюдалось после 3 минут обработки. При дальнейшем измельчении будет происходить агломерация частичек добавки.

Влияние среднего диаметра частичек добавки на сроки схватывания оценивалось по матрице планирования эксперимента, включающая различные комбинации количества добавки и продолжительности её помола. Эксперименты проводились согласно этой матрице, и полученные данные обрабатывались методами математического моделирования [1, 2, 9].

Разработанные регрессионные модели, позволяют спрогнозировать сроки схватывания в зависимости от количества добавки и продолжительности её помола

В начале длительность помола составляла 30, 45, 60 секунд, количество добавки принималось 1, 3, 5 мас. %. Результаты эксперимента представлены в таблице 2.

Таблица 2. Влияние длительности (секунды) помола добавки на сроки схватывания цементного теста

Наименование параметра	Дозировка добавки, мас. %								
	1			3			5		
	Длительность помола добавки, секунды								
	30	45	60	30	45	60	30	45	60
Начало схватывания, мин	120	90	35	100	80	45	110	70	50
Конец схватывания, мин	180	130	90	160	115	110	145	105	120

Следует отметить, что у состава без добавки начало схватывания составляло 140 минут, а конец схватывания – 205 минут.

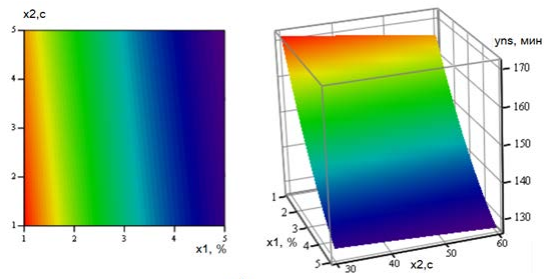
Анализ экспериментальных данных показал, что для сокращения сроков схватывания необходимо использовать добавку в количестве 1 мас. % при продолжительности помола 1 мин.

Для описания зависимостей между количеством добавки, продолжительностью помола и временем схватывания цементной матрицы были разработаны регрессионные модели. Основной задачей являлось создание таких моделей, которые бы позволяли прогнозировать сроки схватывания в зависимости от указанных факторов. После построения моделей проводились расчеты, подтверждающие их точность и пригодность для практического применения [3-6, 11, 12, 14].

В результате математической обработки экспериментальных данных получены следующие уравнения регрессии графики зависимости процесса схватывания от продолжительности помола и количества добавки первого этапа эксперимента (рис. 1 и 2):

- для начала схватывания:

$$У_{ns}=188,472-16,877\cdot x1-1,514\cdot x2+0,208\cdot x1\cdot x2+1,042\cdot x1^2-0,015\cdot x2^2, \quad (1)$$

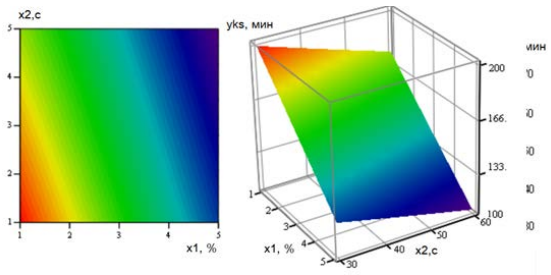


а)

Рис. 1. Влияние длительности помола (секунды) и количества добавки на начало схватывания (а)

- для конца схватывания

$$Yks=437,29-29,875\cdot x1-10,458\cdot x2+0,542\cdot x1\cdot x2+0,078\cdot x2^2, \quad (2)$$



б)

Рис. 2. Влияние длительности помола (секунды) и количества добавки на конец схватывания (б)

Далее длительность помола принимали 1, 3, 5 минут, количество добавки оставалось прежним (1 – 3 мас. %). Результаты эксперимента представлены в таблице 3.

Анализ экспериментальных данных показал, что для сокращения сроков схватывания необходимо использовать добавку в количестве 1 мас. % при продолжительности помола 1 мин.

Таблица 3. Влияние длительности (минуты) помола добавки на сроки схватывания цементного теста

Наименование параметра	Дозировка добавки, мас. %								
	1			3			5		
	Длительность помола добавки, секунды								
	1	3	5	1	3	5	1	3	5
Начало схватывания, мин	35	55	85	45	65	80	50	75	110
Конец схватывания, мин	90	130	150	110	140	150	120	155	170

В результате математической обработки экспериментальных данных получены следующие уравнения регрессии графики зависимости процесса схватывания от продолжительности помола и количества добавки второго этапа эксперимента (рис. 3 и 4):

- для начала схватывания:

$$Yks = 32{,}917 - 4{,}375x1 + 6{,}46x2 + 0{,}625x1x2 + 1{,}25x1^2 + 0{,}625x2^2 \qquad (3)$$

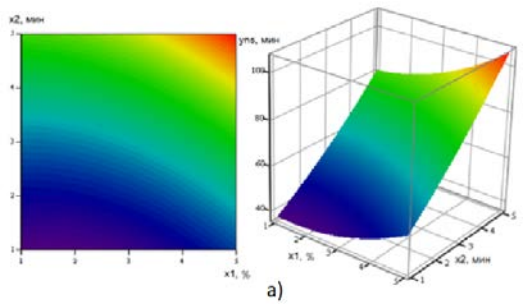


Рис. 3. Влияние длительности помола (минуты) и количества добавки на начало схватывания (а)

- для конца схватывания:

$$Yks = 61{,}25 + 4{,}375X1 + 29{,}375x2 - 0{,}625X1X2 + 0{,}625x1^2 2{,}5x2^2, \qquad (4)$$

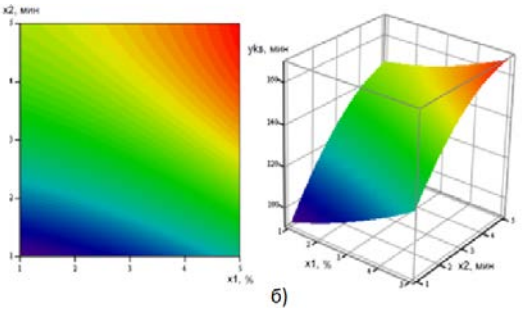


Рис. 4. Влияние длительности помола (минуты) и количества добавки на конец схватывания (б)

Для получения общих моделей объединены приведенные выше модели сроков схватывания от длительности помола. Для этого длительность помола была приведена к единой шкале: 30 секунд = 0,5 минуты; 45 секунд = 0,75 минуты. Таким образом получены следующие модели (рис. 5 и 6):

- *для начала схватывания для времени помола в минутах (0,5; 0,75; 1,0; 3,0; 5,0)*

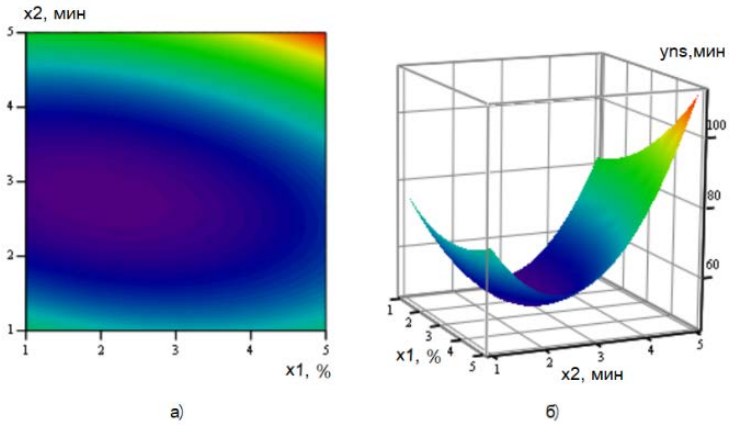


Рис. 5. Влияние длительности помола и количества добавки на начало схватывания: а) график изолиний; б) график поверхности

- для конца схватывания для времени помола в минутах (0,5; 0,75; 1,0; 3,0; 5,0)

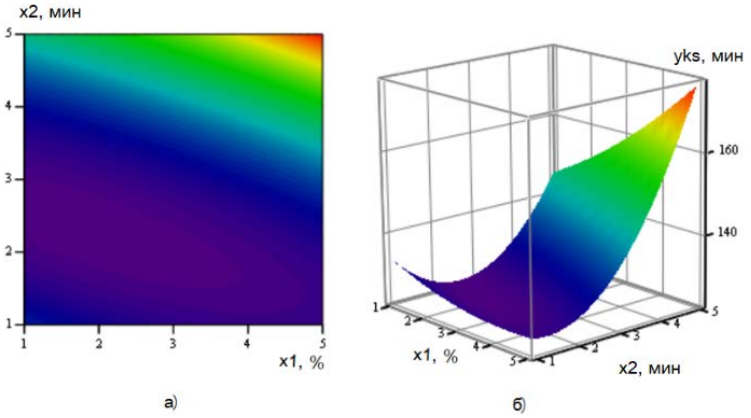


Рис. 6. Влияние длительности помола и количества добавки на конец схватывания: а) график изолиний; б) график поверхности

Все экспериментальные данные проверены на адекватность. Вычисление коэффициента детерминации (R^2) показало высокую степень соответствия модели экспериментальным данным (R^2=0,96-0,99), что подтверждает их надёжность.

Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что модифицирование цементных систем тонкодисперсными цементными кристаллогидратами приводит к значительному ускорению процесса схватывания. Наибольшего ускоряющего эффекта удалось достичь при введении 1 % такой добавки, измельченной до диаметра частицы 5,867 мкм. Процесс схватывания при этом ускоряется: начало схватывания – в 3,9 раза; окончание схватывания – в 2,3 раза.

Разработанные регрессионные модели позволяют точно прогнозировать сроки схватывания, что открывает новые возможности для создания модифицированных цементов с заданными свойствами.

Список использованной литературы

1. Бутенко Г.А. Нелинейные регрессионные модели прочности бетона на сжатие, учитывающие совместное влияние заполнителей. В книге: XXII Региональная конференция молодых ученых Волгоградской области. Тезисы докладов. Ответственный редактор А.В. Навроцкий. 2017. С. 251-253.

2. Воскобойников Ю. Е. Эконометрика в EXCEL: парные и множественные регрессионные модели: учебное пособие / Ю. Е. Воскобойников. - Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань, 2016. - 260 с. : ил., табл. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Библиогр.: с. 259. - ISBN 978-5-8114-2318-7: 1099.67.

3. Ильина Л.В. Изменение технологических свойств и прочностных

характеристик высокоподвижного бетона введением комплексного модификатора / Л.В. Ильина, Г.И. Бердов, Н.С. Вишняков, Д.А. Цекарь // Строительные материалы. 2024. № 1-2. С. 15-21. https://doi.org/ 10.31659/0585-430x-2024-821-1-2-15-21

4. Ильина Л.В., Влияние модифицирования цементной матрицы тонкодисперсной минеральной добавкой на её характеристики/ Л.В. Ильина, С.М Анпилов, Д.А. Цекарь // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 1 (62). С. 155-165. DOI: 10.24866/2227-6858/2025-1/155-165

5. Ильина Л.В., Моделирование процессов кинетики цементных композитов, модифицированных кальций-содержащими добавками/ Л.В. Ильина, С.В. Самченко, М.А. Раков, Д.А. Зорин // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2023. Т. 15, № 5. С. 494–503. DOI: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-494-503

6. Каприелов С.С., Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов/ С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, В.Г. Дондуков // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 4–10. EDN: ZWUFVB

7. Копаница Н.О., Комплексные добавки на основе вторичных ресурсов для модификации цементных композиций/ Н.О. Копаница, О.В. Демьяненко, А.А. Куликова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 1. С. 136–144. DOI: https://doi.org/10.18799/24131830/2023/1/4045.

8. Лесовик В.С., Композиты нового поколения для специального строительства/ В.С. Лесовик, Р.С. Федюк // Строительные материалы. 2021. № 3. С. 9–17. DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021- 789-3-9-17

9. Слободина В.О. Линейные регрессионные модели в прикладных задачах. В сборнике: Математика и ее приложения в современной науке и практике. Сборник научных статей VII Международной научно-практической конференции. Редколлегия: Е.А. Бойцова (отв. ред.) [и др.]. 2017. С. 54-60.

10. Тараканов О.В., Принципы получения высокопрочных бетонов с использованием местных сырьевых ресурсов/ О.В. Тараканов, Х.Б. Фишер // Эксперт: теория и практика. 2024. № 3(26). С. 112–117. DOI: https://doi.org/10.51608/26867818_2024_3_112.

11. Dabbaghi F., Characterizing fiber reinforced concrete incorporating zeolite and metakaolin as natural pozzolans/ F. Dabbaghi, A. Sadeghi-Nik, N.A. Libre, S. Nasrollahpour // Structures. 2021. № 34. P. 2617–2627. DOI: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.025.

12. Ilina L., Aerated dry mix concrete for remote northern territories / L. Ilina, A. Kudyakov, M. Rakov // Magazine of Civil Engineering. 2022. № 5 (113). Article No. 11310. DOI: 10.34910/MCE.113.10 152

13. Ilina L., Dry Building Mixrure with Complex Dispersed Mineral Additives / L. Ilina, I. Mukhina //AOP IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 953, P. 012036. Doi:10.1088/1757-899X/953/1/012036.

14. Senhadji Y., Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar / Y. Senhadji, G. Escadeillas, M. Mouli, H. Khelafi Benosman. // Powder Technology. 2014. № 254. P. 314–323. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.01.046.

УДК 624.011.14

ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ LVL ОТ РЕЖИМОВ НАГРУЖЕНИЯ

Коваль Павел Сергеевич [1], к.т.н., доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, **Кушнир Анна Эдуардовна** [2], ассистент кафедры железобетонных и каменных конструкций, **Трунина Юлия Валерьевна** [3], магистрант

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская ул., 4, 190005, Российская Федерация), [1] pkoval@lan.spbgasu.ru, [2] kushnir.ana@mail.ru, [3] YUVTrunina@yandex.ru

Аннотация. Из-за особенностей строения LVL свойственно нелинейное поведение при кратковременных и длительных нагружениях, что оказывает существенное влияние на изменение деформационных характеристик конструкций во времени. Происходящие изменения в структуре материала, приводят к накоплению напряжений и деформаций, что может стать предпосылкой к заблаговременному разрушению конструкции. Исходя из этого, одно из важнейших направлений в совершенствовании методов расчета конструкций – учет ползучести и нелинейных свойств материала, что становится возможным благодаря исследованию особенностей его работы на различных этапах жизненного цикла конструкции. Целью проведенной работы является экспериментальное определение напряжений, деформаций и модуля деформаций образцов из LVL при сжатии вдоль волокон при различных режимах испытания (мягком и жестком).
Ключевые слова: длительный модуль деформаций, ползучесть, LVL, физическая нелинейность материала, деформативные характеристики LVL.

DEPENDENCE OF THE LVL DEFORMATION MODULUS ON LOADING MODES

Koval Pavel Sergeevich [1], Ph.D., Associate Professor, Department of Metal and Timber Structures; **Kushnir Anna Eduardovna** [2], Assistant, Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures; **Trunina Yulia Valeryevna** [3], Master's Student

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (2-ya Krasnoarmeyskaya St., 4, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation), [1] pkoval@lan.spbgasu.ru, [2] kushnir.ana@mail.ru, [3] YUVTrunina@yandex.ru

Abstract. Due to the inclusion of LVL, nonlinear behavior under successive and long-term loading is inherent, which has a significant impact on the change in deformation characteristic structures over time. The changes occurring in the gradual material led to the accumulation of stresses and deformations, which can become a prerequisite for the early destruction of the structure. Based on this, one of the fundamental trends in improving the methods of calculating structures is taking into account creep and nonlinear properties of the material, which becomes possible due to the study of its work at various stages of the life cycle. The aim of the work is to experimentally determine the stresses, deformations and modulus of deformation of LVL samples under compression along the fibers under different test conditions (soft and hard).
Keywords: long-term deformation modulus, creep, LVL, physical nonlinearity of the material, deformation characteristics of LVL.

Введение

Большое влияние на изменение прочностных свойств материалов во времени оказывает явление ползучести [1 - 4]. Для неоднородных материалов, таких как LVL, вопрос исследования ползучести является особенно актуальным в силу особенностей строения и невозможности описания процесса деформирования в линейной постановке. Целью работы является проведение серии испытаний образцов LVL для отслеживания корреляции между модулем деформаций и режимами нагружения.

Методы

Испытания на сжатие проводились на гидравлической универсальной испытательной машине POWERTEST U-600, позволяющей проводить испытания со скоростью нагружающей головки от 0,001 до 600 мм/мин в диапазоне нагрузок от 0,01 – 600 кН, погрешность измерения усилия 0,5%. Для измерения перемещений был использован экстензометр EPSILON 3542RA2, устанавливающийся на образец клеммами в предварительно отмеченные

точки на расстоянии 50 мм вверх и вниз от центра тяжести образца вдоль длинной стороны.

Образцы для испытаний были разделены на партии по 20 штук и представляли собой прямоугольные параллелепипеды размерами 135мм х 51 мм х 51 мм, изготовленные из материала многослойного клееного из шпона LVL хвойных пород (сосна, ель) с параллельным расположением волокон в смежных слоях. Перед испытаниями для каждого образца выполнялись измерения геометрических размеров электронным штангенциркулем с погрешностью измерений не более 0,1 мм.

Нагружение образца непрерывно действующей нагрузкой до разрушения производилось двумя способами - по мягкому и жесткому режиму нагружения. Мягкий режим - скорость возрастания нагрузки постоянна в течение испытания и задается в Н/с. Жесткий режим - скорость перемещения штока машины постоянна в течение испытания и задается в мм/мин [5-9].

При выборе скоростей для испытаний были взяты данные из ГОСТ 33124, согласно которому стандартная скорость испытаний LVL на сжатие вдоль волокон 2 ÷ 10 мм/мин (жесткий режим; по мягкому – указания отсутствуют). Стандартная скорость испытаний древесины на сжатие вдоль волокон по ГОСТ 16483.10 4 мм/мин (жесткий режим); 25000±5000 Н/мин (мягкий режим).

Таким образом, для испытаний в мягком режиме приняты следующие значения скоростей изменения нагрузки: 4000 Н/с, 400 Н/с, 4 Н/с. Для испытаний по жесткому режиму приняты следующие перемещения штока испытательной машины: 2 мм/мин, 0,2 мм/мин, 0,02 мм/мин.

Для получения дополнительных значения скоростей для испытаний было найдено промежуточное значение между двумя ближайшими по размерности скоростями формулы (1), (2):

Для мягкого режима:

$$w_4 = \frac{lgw_1 + lgw_2}{2}, \quad (1)$$

где w – скорость перемещения штока машины, Н/с.

Для жесткого режима:

$$v_4 = \frac{lgv_1 + lgv_2}{2}, \quad (2)$$

где v – скорость роста деформаций, мм/мин.

Дополнительное значения для мягкого режима было принято 125,9 Н/с; для жесткого – 0,63 мм/мин.

Предварительно перед испытанием верхняя и нижняя поверхность образцов были обработаны парафином для исключения силы трения, препятствующей поперечным деформациям образца [8, 9, 10].

В результате каждого испытания была построена зависимость напряжений от деформаций сжатия, была зафиксирована разрушая нагрузка на образец и время до разрушения. После достижения нагрузкой максимального значения (разрушающей) наблюдалось резкое падение нагрузки и снижение деформаций.

На рисунке 1 представлен образец в испытательной машине с установленным экстензометром (рисунок 1а), а также после разрушения (рисунок 1б).



а - образец в испытательной установке.



б - разрушенный образец.

Рис. 1. Образцы

Для анализа данных и получения результатов были использованы формулы (3) и (4).

Формула для нахождения секущего модуля деформаций, который является предельным для каждого из образцов:

$$E_c = \frac{\sigma_u}{\varepsilon_u}, \tag{3}$$

где σ_u – предельные напряжение, МПа;
ε_u – относительные предельные перемещения.

Формула для нахождения начального модуля деформаций:

$$E_0 = \frac{2\sigma_u}{\varepsilon_u}. \tag{4}$$

Результаты и обсуждение

Данные, полученные при испытаниях по жесткому режиму:

В таблице 1 представлены результаты, полученные при испытаниях со скоростями 2; 0,2; 0,02; 0,63; и 0,6 мм/мин. Также в таблицы внесены результаты, полученные по формулам 3, 4.

Таблица 1. Результаты испытаний по жесткому режиму

2 мм/мин	t, с	P, кН	ε	E_c, МПа	σ, МПа	E_0, МПа
	63,6	135,9	0,0045	12574	54,4	25147
0,2 мм/мин	t, с	P, кН	ε	E_c, МПа	σ, МПа	E_0, МПа
	603,4	123,3	0,0046	11527	51,7	23054
0,02 мм/мин	t, с	P, кН	ε	E_c, МПа	σ, МПа	E_0, МПа
	9253,25	116,557	0,0062	9852	46,6	19704
0,63 мм/мин	t, с	P, кН	ε	E_c, МПа	σ, МПа	E_0, МПа
	170,8	128,8	0,0043	11546	51,5	23093

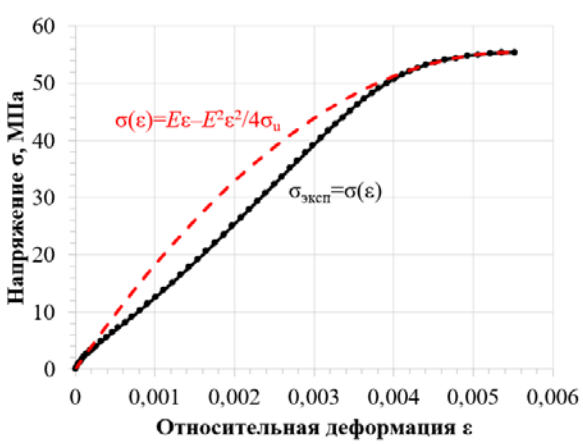
Данные, полученные при испытаниях по мягкому режиму:

В таблице 2 представлены результаты, полученные при испытаниях со скоростями 4000; 400; 4; 12,6; и 125,9 Н/с. Также в таблицы внесены результаты, полученные по формулам 3, 4.

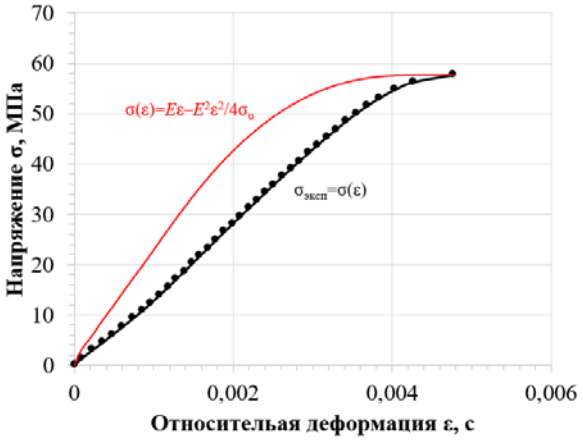
Таблица 2. Результаты испытаний по мягкому режиму

4000 Н/с	t, с	P, кН	ε	E_c, МПа	σ, МПа	E_0, МПа
	36,6	145,13	0,0053	12050	58,05	24100
400 Н/с	t, с	P, кН	ε	E_c, МПа	σ, МПа	E_0, МПа
	350,3	139,9	0,0058	10488	55,96	20976
4 Н/с	t, с	P, кН	ε	E_c, МПа	σ, МПа	E_0, МПа
	3228,2	129	0,007	8796	51,6	17591,8
125,9 Н/с	t, с	P, кН	ε	E_c, МПа	σ, МПа	E_0, МПа
	1118,9	140,7	0,0062	9577	56,3	19154

На рисунке 2 представлены графики зависимости напряжений от деформаций по мягкому (рисунок 2а) и жесткому (рисунок 2б) режимам нагружения.



а – график $\sigma - \varepsilon$ для мягкого режима



б – график $\sigma - \varepsilon$ для жесткого режима

Рис. 2. Графики зависимости напряжений от деформаций

По полученным данным для разных режимов были составлен графики зависимости предельного модуля упругости от скорости приложения нагрузки (рисунок 3) и от скорости роста деформаций (рисунок 4).

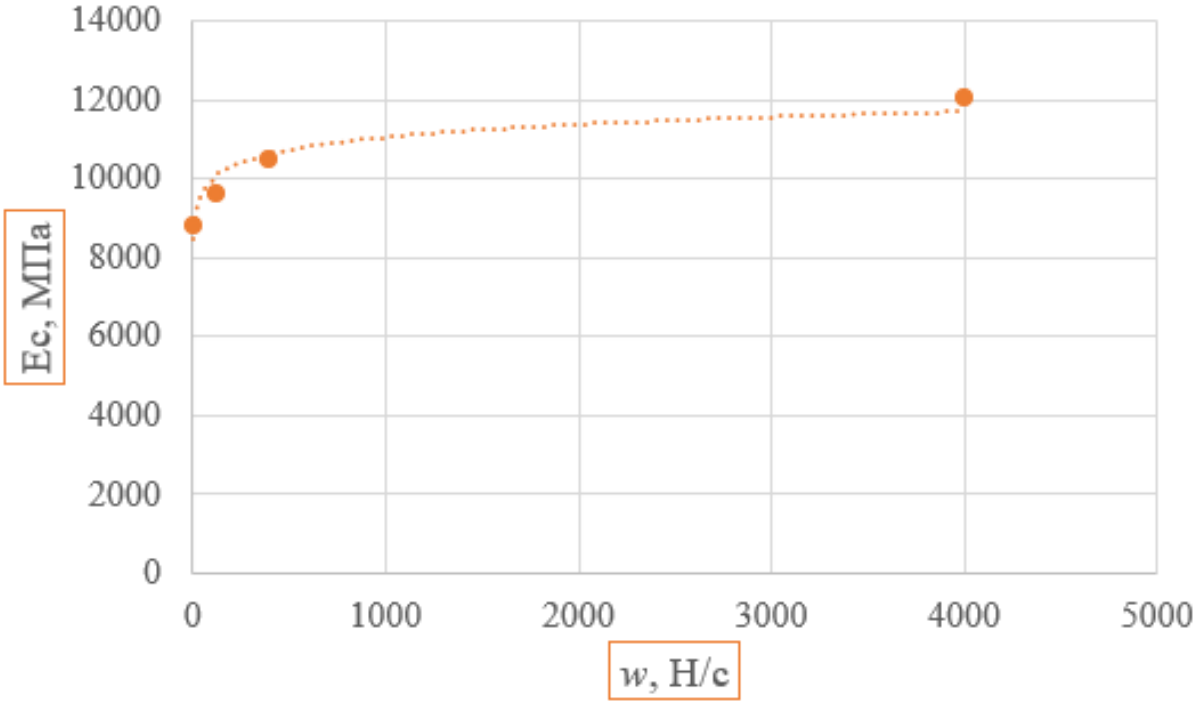


Рис. 3. Зависимость предельного модуля деформаций от скорости приложения нагрузки.

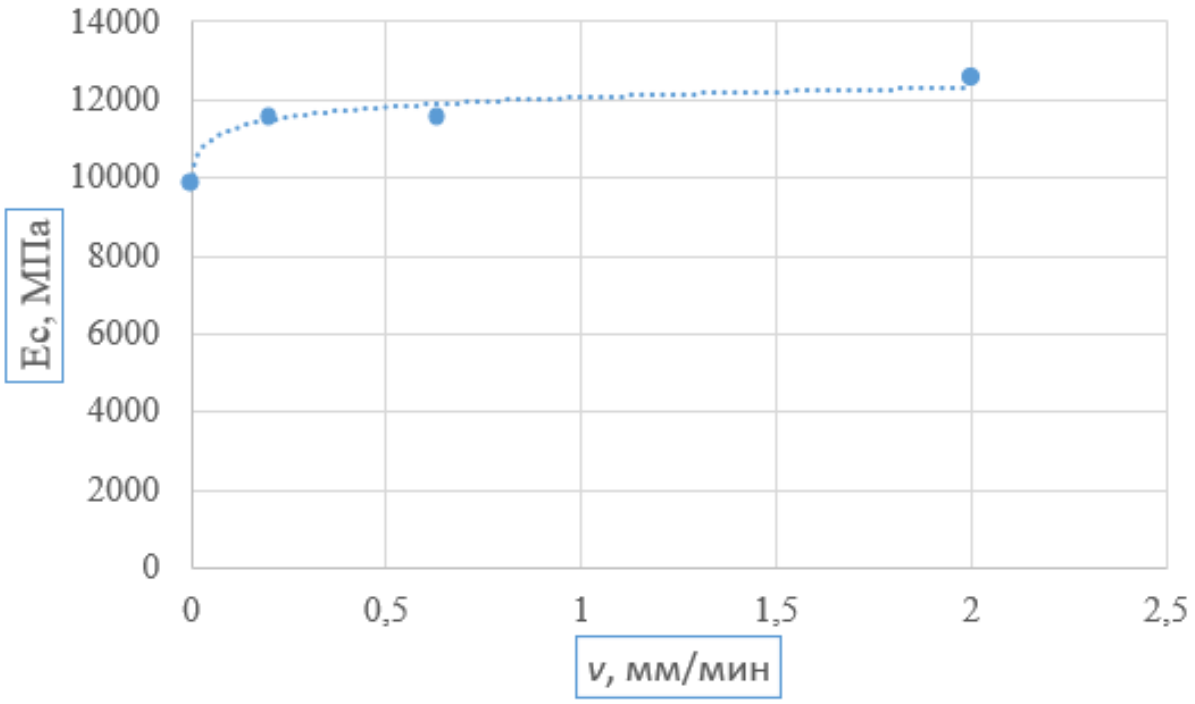


Рис. 4. Зависимость предельного модуля деформаций от скорости роста деформаций.

По графику видно, что данную зависимость можно описать при помощи логарифмической функции по формулам (5), (6).

Для жесткого режима:

$$E_c = 362{,}66 \ln(v) + 12063\ . \tag{5}$$

Для мягкого режима:

$$E_c = 464{,}35 \ln(w) + 7847{,}1\ . \tag{6}$$

Выводы

В ходе проведенного анализа экспериментальных данных были получены значения начального и предельного модулей деформации, которые составили в среднем для мягкого режима: $E_c = 10{,}2$ ГПа, $E_0 = 20{,}5$ ГПа; для жесткого режима: $E_c = 11{,}3$ ГПа, $E_0 = 22{,}7$ ГПа.

После сопоставления результатов была найдена взаимосвязь скорости нагружения и деформативных характеристик образцов. Данная зависимость модулей деформаций от скорости роста деформаций может быть описана логарифмической функцией.

При понижении скорости роста деформации от стандартной (2 мм/мин) до 0,63 мм/мин предельный модуль деформаций снизился на 8,2%.; до 0,2 мм/мин на 8,3%; до 0,02 мм/мин на 21,6%.

При понижении скорости роста нагрузки от 4000 Н/с до 400 Н/с предельный модуль деформаций снизился на 13,0%; до 125,9 Н/с на 20,5%; до 4 Н/с на 27,0%.

Список использованной литературы

1. Ржаницын, А.Р. Теория ползучести / А.Р.Ржаницын – М.: Издательство литературы по строительству, 1968.
2. Пятикрестовский, К.П. О расчете пространственных конструкций с учетом физической нелинейности / К.П. Пятикрестовский // Современные пространственные конструкции: Справочник. - М.: Высшая школа, 1991.
3. Лукаш, П.А. Основы нелинейной строительной механики / П.А. Лукаш. – М.: Стройиздат, 1978.
4. Работнов, Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1977.
5. Сравнительный анализ результатов определения длительной прочности древесины и LVL ускоренным методом при сжатии вдоль волокон / А. Г. Черных, В. Н. Глухих, П. С. Коваль [и др.] // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15, № 6. – EDN GQUYJS.
6. Коваль, П. С. Исследование длительного модуля упругости LVL при кратковременных воздействиях / П. С. Коваль, А. Э. Кушнир // Вестник Евразийской науки. — 2024. — Т 16. — № 3. — URL: https://esj.today/PDF/90SAVN324.pdf (дата обращения: 07.03.2025).
7. Вареник А.С., Вареник К.А. О ползучести древесины // Научное обозрение. Технические науки. – 2015. – № 1. – С. 99-100.
8. Коваль, П. С. Совместное влияние влажности и температуры на прочность LVL / П. С. Коваль, Ю. В. Трунина // Вестник Евразийской науки. — 2024. — Т 16. — № 5. — URL: https://esj.today/PDF/24SAVN524.pdf (дата обращения: 07.03.2025).
9. Коваль, П. С. Ускоренный метод определения длительной прочности древесины и материалов на ее основе / П. С. Коваль // Вестник гражданских инженеров. — 2024. — Т 107. — № 6. — URL: https://vestnik.spbgasu.ru/sites/files/ru/articles/107/Статья7.pdf (дата обращения: 07.03.2025).

УДК 620.193.8:666.972.16:66.018.8

СНИЖЕНИЕ ДЕСТРУКЦИИ БЕТОНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГРИБКОВ *Aspergillus niger* В УСЛОВИЯХ УВЛАЖНЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ КОМБИНИРОВАННОЙ ДОБАВКИ

Коновалова Виктория Сергеевна [1], д.т.н., доцент, профессор кафедры естественных наук и техносферной безопасности, **Строкин Константин Борисович** [2], д.э.н., доцент, советник РААСН, профессор кафедры строительства, директор Технического нефтегазового института, **Гальцев Алексей Андреевич** [2], старший преподаватель кафедры геологии и нефтегазового дела, **Новиков Денис Геннадьевич** [2], к.т.н., и.о. зав.кафедрой строительства

[1] Ивановский государственный политехнический университет (г. Иваново, Шереметевский пр-т, д. 21, 153000, Российская Федерация), kotprotiv@yandex.ru

[2] Сахалинский государственный университет (г. Южно-Сахалинск, Коммунистический пр-т, д. 33, 693000, Российская Федерация), strokin07@rambler.ru, galts.alexey@gmail.com, denis.g.novikov@gmail.com

Аннотация. Для снижения степени воздействия на цементный бетон грибковых микроорганизмов в цементную смесь вводили гидрофобизатор стеарат кальция, ингибитор коррозии нитрат калия и наноразмерный оксид цинка в качестве антимикробного агента в количестве каждого компонента 0,5 % от массы цемента. Степень деструкции цементного камня грибками *Aspergillus niger* оценивали по количеству выведенного из структуры кальция посредством построения профилей концентрации по толщине образцов. Характеристики степени повреждения цементного камня устанавливали по расчетной методике, позволяющей прогнозировать глубину разрушения на разные сроки. Процессы деструкции в цементном камне с комплексной добавкой протекают в поверхностном слое, проникновению агрессивных веществ вглубь структуры препятствует гидрофобная добавка. Развитие деструктивных процессов в бетоне с добавкой протекает в 10 раз медленнее, что свидетельствует о высокой стойкости к биокоррозии.

Ключевые слова: грибковая деструкция бетона; биокоррозия бетона; защита бетона; гидрофобный бетон; добавки в бетон.

REDUCTION OF CONCRETE DEGRADATION FROM THE EFFECTS OF *Aspergillus niger* FUNGI UNDER HUMIDIFICATION CONDITIONS BY INTRODUCING A COMBINED ADDITIVE

Konovalova Viktoriya Sergeevna [1], D.Sc., Docent, Professor of the Department of Natural Sciences and Technosphere Safety, **Strokin Konstantin Borisovich** [2],

D.Sc., Docent, Adviser of RAACS, Professor of the Department of Construction, Director of the Technical Oil and Gas Institute, **Gal'tsev Aleksey Andreevich** [2], Senior Lecturer of the Department of Geology and Oil and Gas, **Novikov Denis Gennadievich** [2], Ph.D., Acting Head of the Department of Construction

[1] Ivanovo State Polytechnic University, (Ivanovo, 21, Sheremetevskiy av., 153000, Russian Federation), kotprotiv@yandex.ru
[2] Sakhalin State University (Yuzhno-Sakhalinsk, 33, Kommunisticheskiy av., 693000, Russian Federation), strokin07@rambler.ru, galts.alexey@gmail.com, denis.g.novikov@gmail.com

Abstract. To reduce the impact of fungal microorganisms on cement concrete, the hydrophobic calcium stearate, corrosion inhibitor potassium nitrate and nanoscale zinc oxide as an antimicrobial agent were introduced into the cement mixture in an amount of 0.5% of the cement weight per component. The degree of destruction of cement stone by *Aspergillus niger* fungi was assessed by the amount of calcium removed from the structure using concentration profiles along the thickness of the samples. The characteristics of the degree of damage to the cement stone were determined using a calculation method that allows predicting the depth of destruction for different periods. The processes of destruction in cement stone with a complex additive occur in the surface layer, the penetration of aggressive substances deep into the structure is prevented by the hydrophobic additive. The development of destructive processes in concrete with the proposed additive proceeds 10 times slower, which indicates a high resistance to biocorrosion.
Keywords: fungal destruction of concrete; biocorrosion of concrete; protection of concrete; hydrophobic concrete; additives in concrete.

Введение

Многие строительные конструкции подвергаются биологическим повреждениям при контакте с почвой, водой, сточными водами, а также с пищевыми продуктами, сельскохозяйственными продуктами и отходами. Биологическое разрушение представляет собой процесс негативного воздействия живых организмов на материалы. В ходе этого процесса формируется специфическая экосистема, где различные формы жизни по-своему взаимодействуют как с минеральными составами, так и с окружающей средой [1-3]. Данный процесс является многофакторным и часто сопровождается дополнительными физическими и химическими реакциями разрушения. Особую роль в этом процессе играют разнообразные микроорганизмы: бактерии, микроскопические грибы и водоросли. Они не только колонизируют внешнюю поверхность бетонных конструкций, но и активно проникают в их структуру через поры, капилляры и микротрещины, что приводит к серьезным нарушениям как в строении материала, так и в его функциональных характеристиках [4-6].

Для защиты бетонных конструкций от биологического разрушения применяются несколько основных подходов:

- Модификация состава бетона – включает поддержание необходимого уровня щелочности для защиты стальной арматуры. При риске биоповреждений важно соблюдать соотношение воды и цемента не более 0,45, а глубина водопоглощения должна быть менее 2 см. В состав добавляют специальные компоненты: полипропиленовые или другие волокна, а также биоцидные добавки [7-11].
- Защитные покрытия – могут наноситься различными способами: распылением, окраской или накатыванием на поверхность бетона. Часто рекомендуется комбинированное применение биоцидов вместе с покрытием, что обеспечивает более эффективную защиту [12-14].
- Особого внимания заслуживает использование бактериостатических композиционных систем, которые обеспечивают длительную защиту бетона от биологического воздействия [8, 9, 11].

Несмотря на то, что биологическое разрушение минеральных материалов (включая бетон) происходит параллельно с различными физическими, химическими и электрохимическими процессами неживой природы, биодеструкцию следует рассматривать как отдельный процесс, не идентичный абиотическим явлениям.

Это обусловлено двумя важными факторами:

- Микроорганизмы не только инициируют, но и значительно ускоряют процессы коррозии.
- Для эффективной защиты конструкций от биологического разрушения требуются специальные антимикробные методы и/или применение биоцидов.

В связи с этим биодеградацию правомерно рассматривать как особый вид коррозии материалов. Важно отметить, что, несмотря на значительные успехи в изучении кинетики и механизмов биокоррозии бетона [15-18], многие аспекты биологического износа материалов остаются неразрешенными.

Следовательно, требуется продолжение исследований как самих процессов биоповреждения бетона, так и методов защиты от них. Это необходимо для разработки более эффективных способов предотвращения биологического разрушения строительных конструкций.

Методы

Для изучения массообмена в цементном камне были изготовлены образцы портландцемента, которые после отверждения были заражены грибами *Aspergillus niger* по методике из ГОСТ 9.048-89 «Единая система защиты от коррозии и старения. Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов». Для изготовления образцов цементного камня в качестве вяжущего использовался

портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н, который имеет стандартизированный состав и не содержит минеральных добавок. Образцы цементного камня были изготовлены с использованием цементного раствора нормальной плотности с водоцементным соотношением 0,3. Испытания проводились после отверждения образцов в течение 28 дней в стандартных условиях. Для изучения процессов массообмена в цементном камне образцам придавали форму кубов размером 3×3×3 см.

Для предотвращения биологического обрастания и прогрессирования грибковой деградации во влажных условиях в цементную смесь при изготовлении цементного камня вводили гидрофобную добавку стеарат кальция [19-21], ингибитор коррозии нитрат калия [22, 23] и проявляющий антимикробные свойства наноразмерный оксид цинка [24] в количестве каждого вещества 0,5 % от массы цемента.

Содержание кальция в цементном камне оценивали с помощью дериватографического анализа образцов.

Ранее был установлен качественный и количественный состав выделяемых грибками *Aspergillus niger* органических кислот [25, 26]. Исходя из этого, были рассчитаны показатели степени повреждения цементного камня согласно ГОСТ Р 52804-2007 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний». Количество цементного камня (в пересчете на CaO), вошедшего в химическое взаимодействие с раствором кислоты, рассчитывается по формуле (1):

$$P_{CaO} = \frac{q_1 \cdot M \cdot f_{\text{экв}(CaO)} \cdot 0{,}05608 \cdot Q}{S \cdot q_2}, \text{г/см}^2, \qquad (1)$$

где: q_1 – объем стандартного раствора с известной концентрацией, пошедшего на титрование раствора после взаимодействия с бетоном, мл; M – концентрация раствора, моль/л; $f_{\text{экв(CaO)}}$ = ½; 0,05608 – молярная масса CaO, соответствующая 1 мл раствора кислоты концентрации 1 моль/л; Q – объем раствора кислоты, участвовавшей во взаимодействии с бетоном в каждый период времени между отдельными испытаниями, мл; S – площадь поверхности образцов, взаимодействовавшей с кислотой, см^2; q_2 – объем раствора, отобранного для титрования, мл.

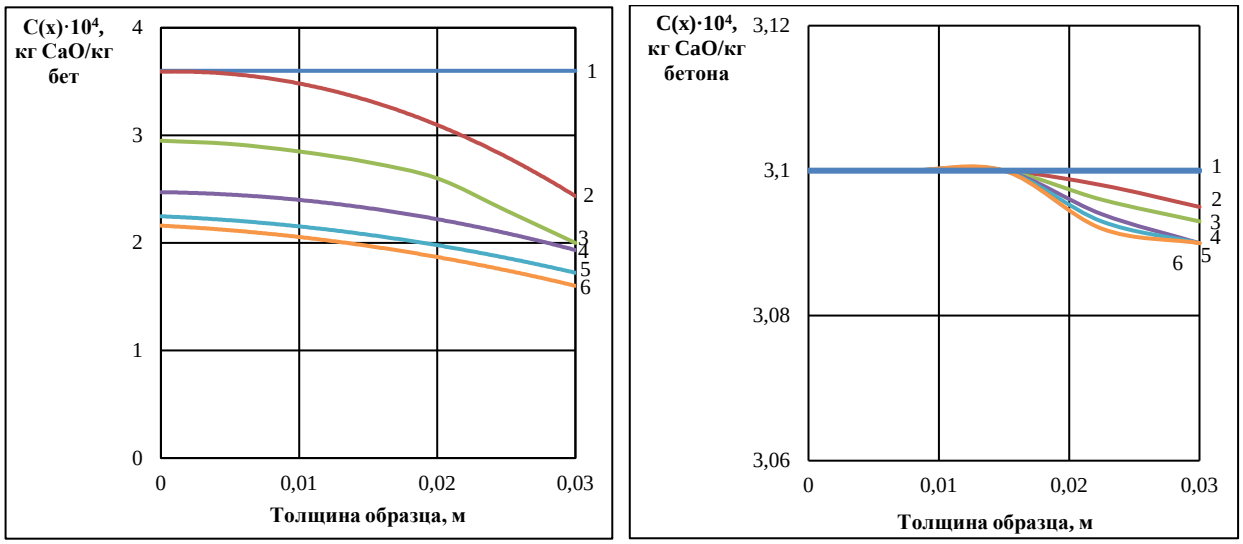
Расчет глубины разрушения бетона, см, проводится по формуле (2):

$$\Gamma_{\text{р}} = \frac{P_{CaO}}{\text{Ц} \cdot \beta}, \qquad (2)$$

где: Ц – количество цемента в 1 см^3 исследуемого образца, рассчитывают по фактическому составу бетона, г/см^3; β – содержание CaO в цементе, определяемое по результатам химического анализа цемента до испытаний, %.

Результаты и обсуждение

Грибковые микроорганизмы и выделяемые ими вещества разрушают кальцийсодержащие компоненты цементного камня и выводят кальций, в том числе в виде солей органических кислот [25, 26]. Степень вымывания кальция из цементного камня с добавками значительно ниже, деградация происходит в поверхностном слое, как видно из рис. 1. Линии 4, 5 и 6 на рис. 1-б сходятся в одной точке на поверхности цементного камня, что свидетельствует о прекращении разрушения кальциевых соединений, что связано с действием добавок. Вероятно, на начальном этапе разложению подвергаются отдельные микроскопические участки поровой структуры и поверхности цементного камня, оставшиеся вне защитного действия введенных в цементную смесь компонентов. Проникновения агрессивных веществ вглубь структуры не происходит вследствие гидрофобного и кольматирующего эффекта от добавки стеарата кальция [27].



а) б)

Рис. 1. Профили концентраций $Ca(OH)_2$ по толщине образца цементного камня а) без добавок; б) с комплексной добавкой, при воздействии грибков *Aspergillus niger* в разные промежутки времени: 1 – 0 сут.; 2 – 14 сут.; 3 – 28 сут.; 4 – 42 сут.; 5 – 56 сут.; 6 – 70 сут.

Анализ данных табл. 1, демонстрирующих степень повреждения цементного камня под воздействием кислот, которые вырабатывают грибы вида *Aspergillus niger*, показывает, что разрушение затрагивает исключительно поверхностный слой материала.

Таблица 1. Степень повреждения цементного камня в результате воздействия грибков *Aspergillus niger*

Показатель	Цементный камень без добавки	Цементный камень с комплексной добавкой
Количество цементного камня (в пересчете на CaO), г/см^2, вошедшего в химическое взаимодействие с растворами кислот	0,644	0,1
Глубина разрушения бетона, см		
- через 6 месяцев	0,016	0,002
- через 10 лет	0,938	0,097
- через 50 лет	2,097	0,218

Прогноз на срок эксплуатации цементного бетона в условиях биообрастания черной плесенью в 10 и 50 лет дает представление о степени повреждения и показывает целесообразность обеспечения защиты бетона посредством введения комплексной добавки, содержащей гидрофобизатор, ингибитор коррозии и фунгицид.

Выводы

Замедление в 10 раз степени деструкции грибками *Aspergillus niger* цементного камня в бетоне с комплексной добавкой свидетельствует о существенной стойкости бетона к микробиологическому воздействию. Можно полагать, что введение в бетон при изготовлении гидрофобной добавки, ингибирующего коррозию вещества и компонента с антимикробным действием обеспечит необходимую долговечность бетонного сооружения, эксплуатирующегося в условиях биообрастания, в том числе и при воздействии влаги.

Список использованной литературы

1. Уряшева Н. Н. Взаимодействие микроорганизмов с каменными строительными материалами // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2017. Т. 17. № 3. С. 65-71. DOI: 10.14529/build170310

2. Bertron A. Understanding interactions between cementitious materials and microorganisms: a key to sustainable and safe concrete structures in various contexts // Materials and Structures. 2014. Vol. 47. Pp. 1787-1806. DOI: 10.1617/s11527-014-0433-1

3. Sazanova K. V., Zelenskaya M. S., Vlasov A. D., Bobir S. Y., Yakkonen K. L., Vlasov D. Y. Microorganisms in Superficial Deposits on the Stone

Monuments in Saint Petersburg // *Microorganisms*. 2022. Vol. *10*. Article ID 316. DOI: 10.3390/microorganisms10020316

4. Ерофеев В. Т., Аль Дулайми Салман Давуд Салман, Федорцов А. П., Богатов А. Д., Федорцов В. А. Биологическая коррозия бетонов // Строительные материалы. 2020. № 11. С. 13-23. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-786-11-13-23

5. Dakal T. C., Cameotra S. S. Microbially induced deterioration of architectural heritages: routes and mechanisms involved // Environmental Sciences Europe. 2012. Vol. 24. Article no. 36. DOI: 10.1186/2190-4715-24-36

6. Bryukhanov A. L., Vlasov D. Y., Maiorova M. A., Tsarovtseva I. M. The Role of Microorganisms in the Destruction of Concrete and Reinforced Concrete Structures // Power Technology and Engineering. 2021. Vol. 54. Pp. 609-614. DOI: 10.1007/s10749-020-01260-5

7. Gerengi H., Kaya E., Solomon M. M., Snape M., Koerdt A. Advances in the Mitigation of Microbiologically Influenced Concrete Corrosion: A Snapshot // *Materials*. 2024. Vol. *17*. Article ID 5846. DOI: 10.3390/ma17235846

8. Соловьева В. Я., Степанова И. В. Высокоэффективный бетон повышенной устойчивости к биологической коррозии // Цемент и его применение. 2023. № 4. DOI: 10.61907/cia.2023.95.63.001

9. Erofeev V., Rodin A., Rodina N., Kalashnikov V., Erofeeva I. Biocidal Binders for the Concretes of Unerground Constructions // Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. Pp. 1448-1454. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.878

10. Fytianos G., Banti D., Dushku E., Papastergiadis E., Yiangou M., Samaras P. Novel Approaches for Biocorrosion Mitigation in Sewer Systems // *Chemistry*. 2021. Vol. *3*. Pp. 1166-1177. DOI: 10.3390/chemistry3040085

11. Rubanov Y. K., Tokach Y. E., Vasilenko M. I., Belovodsky E. A. Composites on the Base of Industrial Waste with Biocidal Components // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. Pp. 219-226. DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6_33

12. Chaudhari B., Panda B., Šavija B., Chandra Paul S. Microbiologically Induced Concrete Corrosion: A Concise Review of Assessment Methods, Effects, and Corrosion-Resistant Coating Materials // *Materials*. 2022. Vol. *15*. Article ID 4279. DOI: 10.3390/ma15124279

13. Ребрикова Н. Л. Исследование совместимости биоцидов и гидрофобизаторов для защиты памятников из камня на открытом воздухе // Художественное наследие. Хранение. Исследование. Реставрация. 2022. №02. С. 41-60.

14. Lisitskaia T., Velikova T. Comparison of methods by micromycetes resistance to paint coatings and biocides // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 215. Article ID 06003. DOI: 10.1051/e3sconf/202021506003

15. Федосов С. В., Нармания Б. Е. Моделирование влияния параметров массопереноса на кинетику коррозионного взаимодействия бетона с биологическими средами // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 4. С. 596-605. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.596-605

16. Строкин К. Б., Гальцев А. А., Коновалова В. С., Нармания Б. Е. Влияние стеарата кальция на микробиологическую коррозию цементного камня бетона // Строительные материалы. 2024. № 8. С. 25-29. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-827-8-25-29

17. Логинова С. А., Петренко А. А. Исследование различных видов биологической коррозии бетона // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022. Т. 49. № 2. С. 150-157. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-150-157

18. Zhang R., Duan J., Xu D., Xia J., Muñoz J.A., Sand W. (2021) Editorial: Bioleaching and Biocorrosion: Advances in Interfacial Processes // Frontiers in Microbiology. 2021. Vol. 12. Article ID 653029. DOI: 10.3389/fmicb.2021.653029

19. Park J.-H., Yoon C.-B. Properties and Durability of Cement Mortar Using Calcium Stearate and Natural Pozzolan for Concrete Surface Treatment // *Materials*. 2022. Vol. *15. Issue 16. Article ID* 5762. DOI: 10.3390/ma15165762

20. Maryoto A., Gan B. S., Aylie H. Reduction of chloride ion ingress into reinforced concrete using a hydrophobic additive material // Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering). 2017. Vol. 79. No. 2. Pp. 65-72. DOI: 10.11113/jt.v79.8857

21. Li W., Wittmann F. H., Jiang R., Zhao T., Wolfseher R. Integral Water Repellent Concrete Produced by Addition of Metal Soaps // Restoration of Buildings and Monuments. 2014. Vol. 18. No. 1. Pp. 41-48. DOI: 10.1515/rbm-2012-6499

22. Ahmad A., Kumar A. Comparative Behaviour of Nitrite and Nitrate for the Protection of Rebar Corrosion // Journal of The Institution of Engineers (India): Series D. 2017. Vol. 98. Pp. 177-187. DOI: 10.1007/s40033-016-0125-9

23. Rumyantseva V. E., Konovalova V. S. The Reinforced Concrete Reinforcement Corrosion Degradation Inhibition with Nitrates of Alkali and Alki-Earth Metals // Materials Science Forum. 2020. Vol. 1011. Pp. 72-78. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1011.72

24. Sabir S., Arshad M., Chaudhari S. K. Zinc Oxide Nanoparticles for Revolutionizing Agriculture: Synthesis and Applications // The Scientific World Journal. 2014. Vol. 2014. Article ID 925494. DOI: 10.1155/2014/925494

25. Строкин К. Б., Новиков Д. Г., Коновалова В. С., Логинова С. А., Нармания Б. Е. Определение ресурса безопасной эксплуатации конструкций из железобетона в условиях микробиологической коррозии // Современные проблемы гражданской защиты. 2020. № 4 (37). С. 62-69.

26. Строкин К. Б., Новиков Д. Г., Коновалова В. С., Осыко А. В., Нармания Б. Е. Прогнозирование воздействия черной плесени Aspergillus niger на здания и сооружения предприятий текстильной и легкой промышленности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 1 (391). С. 128-133. DOI: 10.47367/0021-3497_2021_1_128

27. Konovalova V. S. Investigation of the Effect of Volumetric Hydrophobization on the Kinetics of Mass Transfer Processes Occurring in Cement

Concretes during Corrosion // Materials. 2023. Vol. 16. Issue 10. Article ID 3827. DOI: http://dx.doi.org/10.3390/ma16103827

УДК 691-4

ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ГИДРОГЕЛИ ДЛЯ ИНДИКАЦИИ ПЕРЕГРЕВА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Котлярская Ирина Леонидовна[1*], м.н.с. лаб. защищенных и модульных сооружений, **Носова Анастасия Олеговна** [2], ассистент центра химической инженерии, **Успенская Майя Валерьевна**[1], д.т.н., профессор, профессор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29 литера Б, 195251, Российская Федерация), *iravassilek@mail.ru, mv_uspenskaya@mail.ru
[2] Университет ИТМО (г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49, лит. А, 197101, Российская Федерация), mast225856@yandex.ru

Аннотация. Представлен краткий обзор современных термочувствительных гидрогелей и перспективных направлений их применения. В работе исследован полимерный композит на основе акрилового гидрогеля, содержащего $CoCl_2 \cdot 6H_2O$. Показано, что при нагреве до 180 °C происходит дегидратация и обратимый цветовой переход от прозрачного светло-коричневого к непрозрачному темно-фиолетовому. Установлено, что при погружении высушенного образца в воду происходит обратный цветовой переход. Обсуждается возможность использования данного композита в качестве визуального индикатора перегрева в строительных конструкциях.
Ключевые слова: термочувствительные материалы; термочувствительные гидрогели; полимеры; композиты; ограждающие конструкции.

THERMOSENSITIVE HYDROGEL FOR INDICATION OF OVERHEATING OF BUILDING STRUCTURES

Kotlyarskaya Irina Leonidovna[1*]**,** Junior Researcher of the Laboratory of Protected and Modular Structures, **Nosova Anastasiia Olegovna** [2]**,** Assistant of the Chemical Engineering Center, **Uspenskaya Mayya Valerievna**[1], Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction

[1] Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, vn. ter. g. municipal district Akademicheskoe, st. Polytechnicheskaya, 29 lit. B, 195251, Russian Federation), *iravassilek@mail.ru, mv_uspenskaya@mail.ru
[2] ITMO University, Kronverkskiy Prospekt, 49, lit. A, 197101, Russian Federation), mast225856@yandex.ru

Abstract. A brief review of modern thermosensitive hydrogels and promising areas of their application is presented. A polymer composite based on an acrylic hydrogel containing $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ was investigated. It was shown that upon heating to 180 °C, dehydration and reversible color transition occurs from transparent light brown to opaque dark purple. It was found that immersion of the dried sample in water leads to a reverse color transition. The possibility of using this composite as a visual indicator of overheating in building structures is discussed.
Keywords: thermosensitive materials; thermosensitive hydrogels; polymers; composites; enclosing structures.

Введение

Безопасность и долговечность строительных конструкций напрямую зависят от эффективного контроля температурного режима. Критические повышения температуры, вызванные пожарами, перегрузками электросетей или неисправностями оборудования, могут привести к серьезным разрушениям и представлять угрозу для жизни. Традиционные методы мониторинга температуры, основанные на использовании термопар, термометров сопротивления или инфракрасных камер, зачастую требуют сложной инфраструктуры, постоянного обслуживания и не всегда обеспечивают наглядную и оперативную индикацию превышения допустимых температурных значений. В связи с этим, разработка простых, надежных и визуально определяемых индикаторов перегрева представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

В последние годы значительный интерес вызывают так называемые "интеллектуальные" материалы, способные изменять свои свойства в ответ на внешние стимулы, такие как температура, pH, свет или механическое воздействие. Среди них особое место занимают термочувствительные (или термохромные) гидрогели – трехмерные полимерные сети, способные значительно изменять свой объем и другие свойства при изменении температуры [1,2]. Основу таких гидрогелей составляют термочувствительные полимеры, которые можно разделить на две основные группы: с нижней критической температурой растворения (НКТР, при нагревании претерпевают переход из набухшего состояния в сжатое) и с верхней критической температурой растворения (ВКТР, набухают при повышении температуры до определенного значения) [3]. Свойство термочувствительности возникает из-за тонкого баланса между различными, в том числе гидрофобными и гидрофильными взаимодействиями полимерной

цепи и молекул воды. Благодаря своим характеристикам термочувствительные гидрогели широко применяются для различных биомедицинских целей [4,5], в сельском хозяйстве [6], в преобразовании энергии [7] и других областях.

Рассматриваемые материалы могут быть получены из различных природных и синтетических полимеров или их композиций. Применение синтетических полимеров позволяет точно контролировать химическую структуру и, следовательно, температурный отклик, в то время как природные полимеры обладают улучшенной биосовместимостью [8]. Наиболее исследованным синтетическим полимером, чувствительным к температуре, является поли(N-изопропилакриламид) (PNIPAAm). PNIPAAm представляет собой классический пример гидрогеля с выраженной НКТР 32°C, который способен изменять цвет с прозрачного на белый [9,10]. Другие примеры термочувствительных синтетических полимеров включают поли(винилметиловый эфир) (PVME), поли(этиленоксид) (PEO) и поли(N-винилкапролактам) (PNVCL), каждый из которых обладает собственной температурой фазового перехода. Однако, к недостаткам применения материалов на основе данных полимеров можно отнести дороговизну, ограниченный диапазон температур, возможные низкие механические свойства. Перспективным представляется поиск решений на основе акриловых гидрогелей, характеризующихся простотой синтеза, высокой прозрачностью и возможностью регулирования свойств.

Механизм изменения цвета в гидрогелях может быть реализован не только за счет термочувствительности полимера, но и благодаря введению термохромных красителей и других веществ, к примеру NaCl, в полимерную матрицу. Авторами [11] проведено исследование свойств гидрогеля PVA/NaCl, который обладает противоположным PNIPAAm эффектом: проявляют белый цвет при низкой температуре и прозрачность при высокой температуре, причем данное свойство является стабильным и обратимым. Кроме того, скорость и температуру преобразования цвета можно контролировать, управляя содержанием NaCl. Перспективным направлением является разработка гидрогелей, наполненных гидратированными солями переходных металлов (например, $CoCl_2 \cdot 6H_2O$, $NiCl_2 \cdot 6H_2O$), демонстрирующими термохромные свойства по причине изменения координационного окружения ионов металлов при изменении температуры и влажности.

Исходя из вышесказанного, наполнение акрилового гидрогеля гидратированными солями переходных металлов потенциально может позволить получить материал, сочетающий в себе преимущества обоих компонентов, однако на сегодняшний день исследований в данной области недостаточно. Целью данного исследования является оценка перспектив и возможности использования полимерного композита на основе акрилового гидрогеля с $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ в качестве визуального индикатора изменения температуры.

Методы

Для нагрева образца акрилового гидрогеля, наполненного $CoCl_2 \cdot 6H_2O$, использовался сушильный шкаф BINDER ED 115 (Германия). Визуально оценивалось изменение цвета при нагревании до 180 °C в течение 30 минут и при погружении высушенного образца в дистиллированную воду на 30 минут.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлена фотография образца полимерного композита на основе акрилового гидрогеля с $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ до и после его высушивания при температуре 180 °C. Визуально наблюдается изменение цвета образца из прозрачного светло-коричневого со слабым розовым оттенком до непрозрачного темно-фиолетового. Изменение цвета связано с дегидратацией $CoCl_2$ при нагревании: потеря координационно связанной воды ионами кобальта, что приводит к изменению их электронной структуры и, как следствие, к изменению цвета. Известно, что гидратированные соли кобальта имеют розовато-коричневый цвет, а при потере воды переходят в синюю или фиолетовую форму [12]. Наблюдаемый эффект свидетельствует о наличии у него термохромных свойств и позволяет сделать вывод о перспективности разработки материалов на его основе для использования в качестве визуального индикатора.

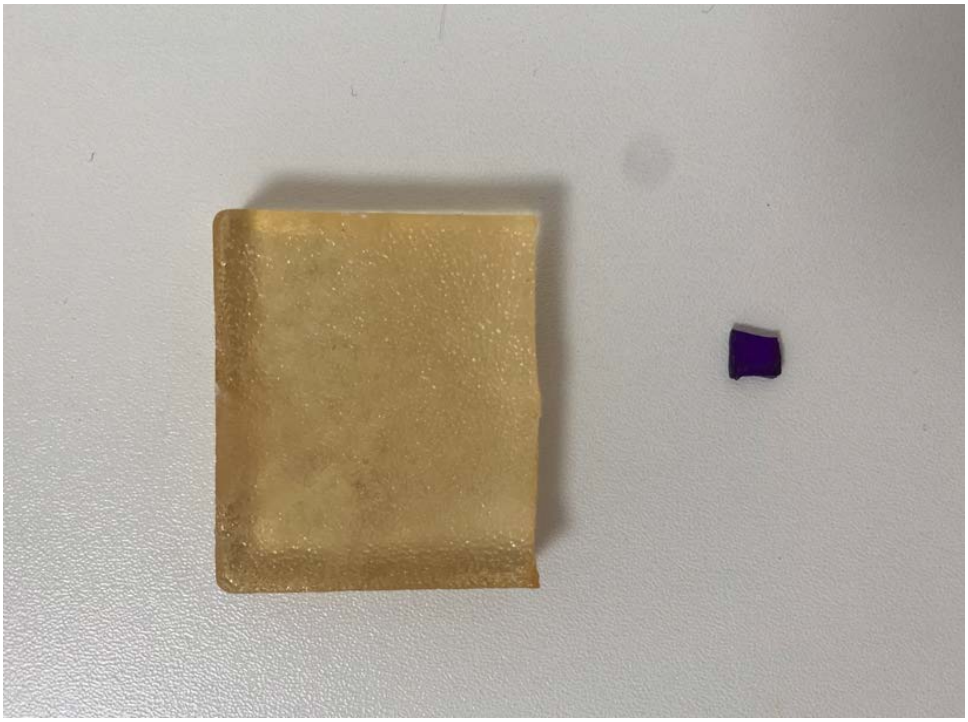


Рис. 1. Гидрогель с $CoCl_2 \cdot 6H_2O$: до воздействия повышенной температуры (слева); после воздействия 180°C (справа)

Данный эффект является обратимым: при погружении высушенного образца в дистиллированную воду с течением времени происходит регидратация, и происходит обратное изменение цвета (рис.2).



Рис. 2. Обратное изменение цвета образца высушенного гидрогеля при погружении в дистиллированную воду

Выводы

Материал на основе акрилового гидрогеля с $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ демонстрирует выраженные термохромные свойства, претерпевая обратимый цветовой переход от прозрачного светло-коричневого к непрозрачному темно-фиолетовому при нагревании до 180 °C, что открывает перспективы для дальнейших исследований, направленных на оптимизацию термочувствительного материала и оценку возможности его интеграции в строительные конструкции (к примеру, светопрозрачные: стекла, перегородки), что может обеспечить визуальный контроль температурного режима и способствовать своевременному реагированию на потенциальные аварийные ситуации.

Список использованной литературы

1. Kabir, M.M., Sabur, G.M., Mamun, M.F.K., Arman, Tijing, L., Choden, Y., Phuntsho, S., Shon, H.K. Hydrogels in next-generation energy solutions // Desalination. 2025. No. 603. P. 118639. DOI: 10.1016/J.DESAL.2025.118639.

2. Zhang, X., Yuan, J., Han, Y., Kong, X. Thermochromic hydrogel couple energy storage integrated smart window with adjustable temperature point and thermochromic temperature zone // Energy and Buildings. 2024. No. 324. P. 114891. DOI: 10.1016/J.ENBUILD.2024.114891.

3. Haq, M.A., Su, Y., Wang, D. Mechanical properties of PNIPAM based hydrogels: A review // Materials Science and Engineering. 2017. No. 70. Pp. 842–855. DOI: 10.1016/J.MSEC.2016.09.081.

4. Wong, K.Y., Nie, Z., Wong, M.S., Wang, Y., Liu, J. Metal–Drug Coordination Nanoparticles and Hydrogels for Enhanced Delivery // Advanced Materials. 2024. No. 36. P. 2404053. DOI: 10.1002/ADMA.202404053.

5. Amit A., Ajazuddin, Junaid K., Swarnlata S., Shailendra S., Polyethylene glycol (PEG)–Poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPAAm) based thermosensitive injectable hydrogels for biomedical applications // European Journal of

Pharmaceutics and Biopharmaceutics. 2014. Vol.88. Issue 3. Pp. 575-585. DOI: 10.1016/j.ejpb.2014.07.005.

6. Kaur, P., Agrawal, R., Pfeffer, F.M., Williams, R., Bohidar, H.B. Hydrogels in Agriculture: Prospects and Challenges // Journal of Polymers and the Environment. 2023. No. 31. Pp. 3701–3718. DOI: 10.1007/S10924-023-02859-1.

7. Das, S., Chakraborty, P., Shit, A., Mondal, S., Nandi, A.K. Robust hybrid hydrogels with good rectification properties and their application as active materials for dye-sensitized solar cells: insights from AC impedance spectroscopy // Journal of Materials Chemistry. 2016. No. 4. Pp. 4194–4210. DOI: 10.1039/C5TA08833J.

8. Wang, Y., Tan, X., Yang, X., Qi, G. и Tu, Y. Hydroxypropyl cellulose thermochromic hydrogel with efficient passive radiative cooling and adjustable visible light transmittance // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2024. No. 271. P. 112871. DOI: 10.1016/J.SOLMAT.2024.112871.

9. Jochum, F.D., Theato, P. Temperature- and light-responsive smart polymer materials // Chemical Society Reviews. 2013. No. 42. Pp. 7468–7483. DOI: 10.1039/C2CS35191A.

10. Guo, R., Shen, Y., Chen, Y., Cheng, C., Ye, C., Tang, S. KCA/Na2SiO3/PNIPAm hydrogel with highly robust and strong solar modulation capability for thermochromic smart window // Chemical Engineering Journal. 2024. No. 486. P. 150194. DOI: 10.1016/J.CEJ.2024.150194.

11. He, Q., Fang, Y.Q., Han, Y., Qin, W.N., Nie, J.K., Hou, D., Zhu, K. Novel synthesis of PVA/NaCl hydrogel for reversible thermochromism // Optical Materials. 2022. No. 132. P. 112754. DOI: 10.1016/J.OPTMAT.2022.112754.

12. Раков Э. Г. Кобальта галогениды // Химическая энциклопедия: в 5 т. / Гл. ред. И. Л. Кнунянц. М.: Советская энциклопедия, 1990. Т. 2: Даффа Меди. 671 с.

УДК 691-4

БИБЛИОМЕТРИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ МАТЕРИАЛАМ

Котлярская Ирина Леонидовна[1*], м.н.с. лаб. защищенных и модульных сооружений, **Успенская Майя Валерьевна**[1], д.т.н., профессор, профессор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, **Ватин Николай Иванович**[1], д.т.н., профессор, профессор Высшей школы передовых цифровых технологий

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29 литера Б, 195251, Российская Федерация), *iravassilek@mail.ru, mv_uspenskaya@mail.ru, vatin@mail.ru

Аннотация. Библиометрический анализ публикаций в Scopus за 2015-2025 (на 05.06.2025) выявил возрастающую тенденцию исследований в области термочувствительных материалов. Объектом анализа стал массив из 4384 публикаций, в названиях которых встречаются термины «thermosensitive», «thermoindicator» или «thermochromic». Лидирующую позицию по количеству публикаций занимает Китай (2200 статей), за которым следуют США (381 документ). Анализ ключевых слов указывает на то, что исследования в основном сосредоточены на полимерных материалах и нанотехнологиях, используемых для разработки термочувствительных систем. С использованием программы VOSviewer произведено научное картирование данных.

Ключевые слова: термочувствительные материалы; термохромные материалы; термоиндикаторы; наукометрия; библиометрия; научное картирование.

BIBLIOMETRIC MAPPING OF SCIENTIFIC RESEARCH ON THERMOSENSITIVE MATERIALS

Kotlyarskaya Irina Leonidovna[1*]**,** junior researcher of the Laboratory of Protected and Modular Structures, **Uspenskaya Maya Valerievna**[1], Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, **Vatin Nikolay Ivanovich**[1], Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Higher School of Advanced Digital Technologies

[1] Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, vn. ter. g. municipal district Akademicheskoe, st. Polytechnicheskaya, 29 lit. B, 195251, Russian Federation), *iravassilek@mail.ru, mv_uspenskaya@mail.ru, vatin@mail.ru

Abstract. A bibliometric analysis of publications in Scopus for 2015-2025 (as of 06.05.2025) revealed an increasing trend in research in the field of thermosensitive materials. The object of the analysis was an array of 4384 publications that contain the terms "thermosensitive", "thermoindicator" or "thermochromic" in their titles. The leading position in the number of publications is occupied by China (2200 articles), followed by the United States (381 documents). Keyword analysis indicates that the research is mainly focused on polymeric materials and nanotechnology used to develop thermosensitive systems. Scientific data mapping was performed using the VOSviewer program.
Keywords: thermosensitive materials; thermochromic materials; thermal indicators; scientometrics; bibliometrics; scientific mapping.

Введение

Термочувствительные материалы представляют собой класс веществ, которые выраженно изменяют свои физические или химические свойства в ответ на изменения температуры [1]. Одним из ключевых типов термочувствительных материалов являются термохромные вещества, демонстрирующие изменение цвета в зависимости от температуры [2]. Материалы, способные визуально демонстрировать изменение температуры посредством изменения цвета или других оптических свойств, также называют термоиндикаторами или термоиндикаторными веществами [3]. Цветовые изменения под влиянием температуры могут быть обратимыми или необратимыми и находят применение в разнообразных областях, включая медицину [4], электронику [5], сенсорные технологии [6], полиграфию [7] и строительство [8].

Учитывая стремительное развитие технологий в области термочувствительных материалов, возникает необходимость в актуализации научных данных и создании анализа с количественной оценкой темпов роста исследований по данной теме. Для визуализации интеллектуальных связей внутри динамично меняющейся системы знаний используется научное картирование [9].

Целью данной статьи является библиометрическое картирование и анализ публикаций из научной базы данных Scopus с 2015 по 2025 (на 05.06.2025) включительно, в которых представлены исследования по термочувствительным, термохромным и термоиндикаторным материалам, выявление тенденций, и регионов, активно занимающихся исследовательской проблемой.

Методы

Для сбора библиометрической информации по исследованиям в области термочувствительных, термохромных и термоиндикаторных материалов и их свойств использовалась научная база данных Scopus, которая зарекомендовала себя как одна из крупнейших и наиболее полных баз данных рефератов и цитирований рецензируемой литературы, охватывающая широкий спектр

научных источников по различным дисциплинам [10]. Авторы искали публикации, в названиях, которых встречаются термины «thermosensitive» «thermoindicator» или «thermochromic». Рассматривались публикации, вышедшие с 2015 по 2025 (на дату 05.06.2025). VOSviewer (версия 1.6.18) использовался для построения научной визуализации и количественной оценки полученного материала. VOSviewer — это свободно доступный инструмент картирования с открытым исходным кодом, который используется в различных областях исследований [11].

Результаты и обсуждение

Анализу подлежали 4384 документа по теме термочувствительных материалов. На рис.1 показано распределение научной литературы за последние десять лет.

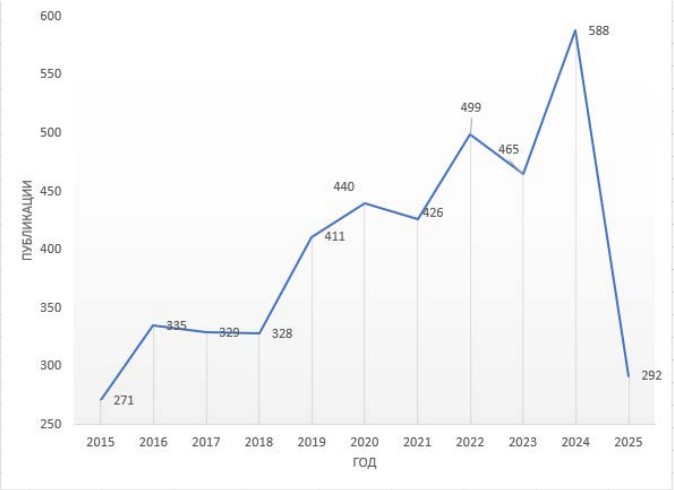


Рис. 1. Количество публикаций за каждый год с 2015 по 2025 (05.06.2025) включительно

На данном графике прослеживается возрастающая тенденция по исследованию термочувствительных материалов. Так как от начала 2025 года прошло всего 6 месяцев, то можно предположить, что в конце 2025-го года будет опубликовано еще столько же документов. Без учета 2025-го года коэффициент корреляции составляет 0,94.

Термочувствительные материалы применяются в разных отраслях, и круговая диаграмма на рис. 2, созданная на основе данных научной базы Scopus показательно отражает это.

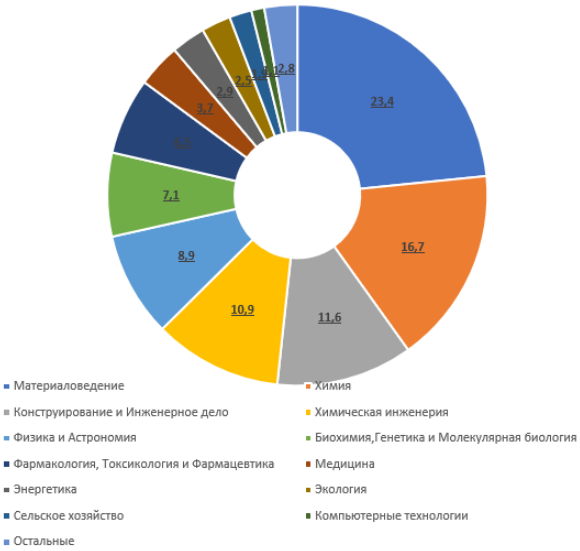


Рис. 2. Процентное распределение публикаций о термочувствительных материалах по отраслям знаний

Над исследованиями по термочувствительным материалам за выбранный период работало 19469 ученых по всему миру. У 438 исследователей написано, как минимум, по 5 публикаций. На рис. 3 представлена карта научного взаимодействия ученых. Разные цвета обозначают отдельные кластеры ученых, которые наиболее тесно взаимодействуют друг с другом. Самыми вовлеченными исследователями являются: Jin P. (Шанхай, Китай, 31 публикация), Long Y. (Гонконг, Китай, 26 публикаций), Cao X. (Шанхай, Китай, 24 публикации).



Рис. 3. Научная карта соавторства из 20 кластеров в области термочувствительных материалов в период с 2015 по 2025 включительно

Согласно научной карте стран (рис.4) лидирующую позицию в исследуемой области занимает Китай. Китай опубликовал 2200 статьи, что составляет более 50% от объема отобранных по теме публикаций. Далее следует США – 381 документ.

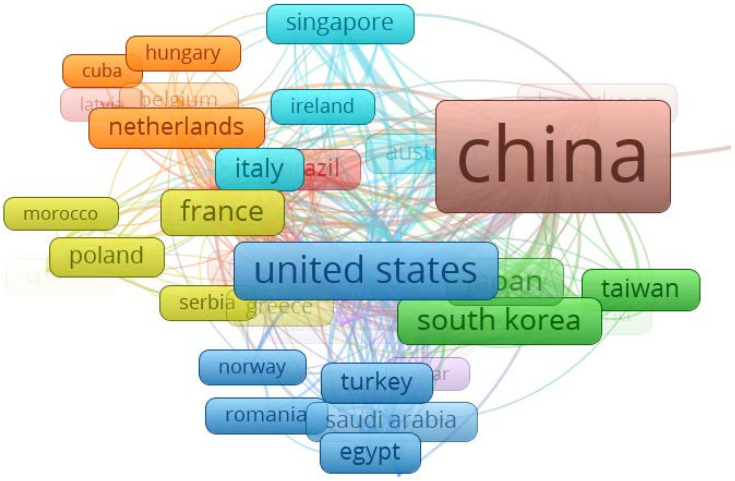


Рис. 4. Научная карта партнерства стран в области термочувствительных материалов в период с 2015 по 2025 включительно

Программа VosViewer подсчитала, что в 4384 документах содержится 27850 неповторяющихся ключевых слов или словосочетаний. На рис. 5 представлен массив ключевых слов и словосочетаний, которые встречаются в работах, как минимум, 15 раз (1119 слов). Среди них наиболее часто встречающимися являются «hydrogels» (гидрогели), «temperature» (температура), «vanadium dioxide» (диоксид ванадия) и «nanoparticles» (наночастицы).

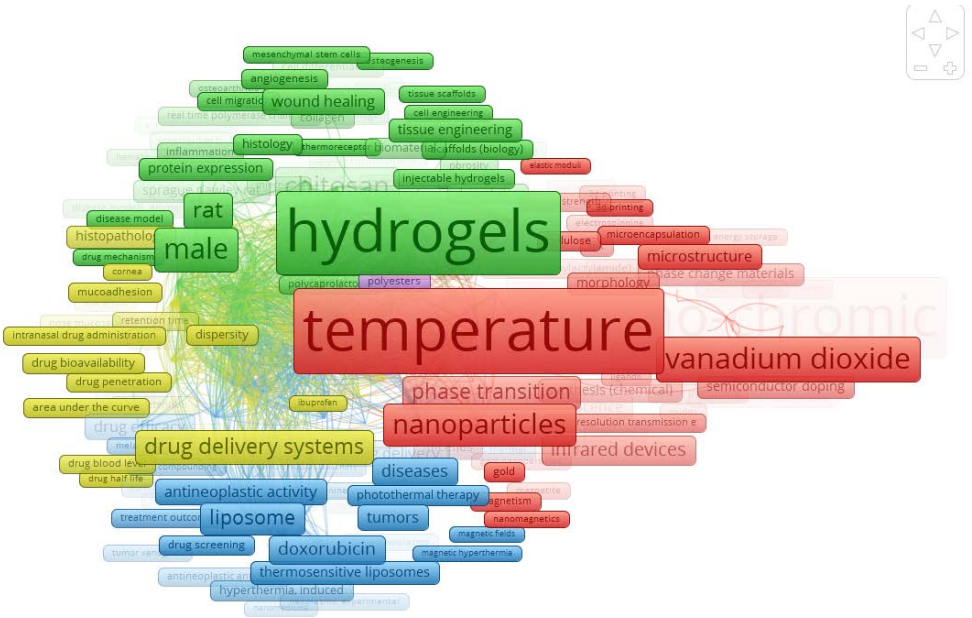


Рис. 5. Научная карта ключевых слов в области термочувствительных материалов в период с 2015 по 2025 включительно

Выводы

Анализ базы Scopus за период 2015-2025 (на 05.06.2025) выявил стремительный рост числа публикаций, посвященных термочувствительным

материалам. Наибольшее количество статей опубликовано исследователями из Китая и США, что свидетельствует о ведущей роли этих стран в развитии данной области. Наиболее вовлеченным в исследовательскую тему является ученый из Китая Jin P. Анализ ключевых слов показал, что наиболее часто используемыми терминами являются «гидрогели», «температура», «диоксид ванадия» и «наночастицы». Это указывает на то, что исследования в основном сосредоточены на полимерных материалах и нанотехнологиях, используемых для разработки термочувствительных систем.

Список использованной литературы

1. Das, S., Chakraborty, P., Shit, A., Mondal, S., Nandi, A.K. Robust hybrid hydrogels with good rectification properties and their application as active materials for dye-sensitized solar cells: insights from AC impedance spectroscopy // Journal of Materials Chemistry A. 2016. Vol. 4. Pp. 4194–4210. DOI: 10.1039/C5TA08833J.

2. Lima, O., Cardoso, P., Segundo, I.R., Freitas, E., Costa, M.F.M., Nascimento, H., Afonso, C., Landi, S., Teixeira, V., Carneiro, J. Thermochromism applied to Transportation Engineering: asphalt roads and paints // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2407. P. 012042. DOI: 10.1088/1742-6596/2407/1/012042.

3. Yang, L., Li, Z.M. The Research of Temperature Indicating Paints and its Application in Aero-engine Temperature Measurement // Procedia Engineering. 2015. Vol. 99. Pp. 1152–1157. DOI: 10.1016/J.PROENG.2014.12.697.

4. Shi, Q., Li, M., Gong, K., Zhao, Z., Liu, D., Zhou, X. Stable low temperature reversible thermochromic indicators for vaccine storage and transportation // Dyes and Pigments. 2025. Vol. 241. P. 112894. DOI: 10.1016/J.DYEPIG.2025.112894.

5. Kumar, S.S., Niyagama, W.W., Akmal, J.S., Salmi, M. 4D printing of electro-activated thermochromic composites for dynamic 3D displays // Materials & Design. 2025. Vol. 251. P. 113674. DOI: 10.1016/J.MATDES.2025.113674.

6. Jaiban, P., In-on, N., Injay, B., Arunroj, P., Homket, P., Watcharapasorn, A. Thermochromic biofilm from longkong peels for temperature sensors // Results in Chemistry. 2025. Vol. 15. P. 102263. DOI: 10.1016/J.RECHEM.2025.102263.

7. Zhou, F., Zhang, Y., Zong, H., Zhou, G. Photochromic and thermochromic inks based on supramolecular complexes of viologens and cyclodextrin for printable anticounterfeiting applications // Chemical Engineering Journal. 2025. Vol. 507. P. 160650. DOI: 10.1016/J.CEJ.2025.160650.

8. Hidalgo-Araujo, A.C., Salomão, R., Berardi, U., Dornelles, K.A. Thermochromic materials for building Applications: Overview through a bibliometric analysis // Solar Energy. 2025. Vol. 293. P. 113491. DOI: 10.1016/J.SOLENER.2025.113491.

9. Amiruddin, M.Z. Bin, Samsudin, A., Suhandi, A., Coştu, B., Prahani, B.K. Scientific mapping and trend of conceptual change: A bibliometric analysis // Social

Sciences & Humanities Open. 2025. Vol. 11. P. 101208. DOI: 10.1016/J.SSAHO.2024.101208.

10. Chamorro, K., Álvarez, R.C., Ahtty, M.C., Quinga, M. Comprehensive bibliometric analysis of advancements in artificial intelligence applications in medicine using Scopus database // Franklin Open. 2025. Vol. 10. P. 100212. DOI: 10.1016/J.FRAOPE.2025.100212.

11. Hussin, M.S.F., Serah, A.M., Azlan, K.A., Abdullah, H.Z., Idris, M.I., Ghazali, I., Shariff, A.H.M., Huda, N.,Zakaria, A.A. A Bibliometric Analysis of the Global Trend of Using Alginate, Gelatine, and Hydroxyapatite for Bone Tissue Regeneration Applications // Polymers. 2021. Vol. 13. Page 647, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 13, P. 647. DOI: 10.3390/POLYM13040647.

УДК 691

ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КРУЖАЛЬНЫХ LVL-КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Котова Елизавета Владимировна[1], аспирант кафедры металлических и деревянных конструкций, **Данилов Егор Владимирович**[2], к.т.н., доцент кафедры металлических и деревянных конструкций

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, 190005, Российская Федерация), [1]Elizaveta-Kotova_2000@mail.ru, [2] sleepme@mail.ru

Аннотация. В данной работе рассматривается численное моделирование несущей способности кружальных конструкций, выполненных из ламинированной шпоновой древесины (LVL). Цель исследования — создание достоверной расчетной модели, способной точно отражать поведение конструкции под различными видами нагрузок. Исследование основано на учете физико-механических особенностей LVL, включая анизотропию и неоднородность структуры материала. Особое внимание уделяется влиянию геометрических параметров элементов на прочностные характеристики. Для анализа использован метод конечных элементов, позволяющий выявить особенности напряжённо-деформированного состояния конструкции в реальных условиях эксплуатации. Результаты моделирования соотнесены с положениями нормативных документов. Работа направлена на повышение точности проектных расчетов, улучшение эксплуатационных характеристик и обеспечение конструктивной надежности при оптимизации материальных затрат.

Ключевые слова: кружальные конструкции, МКЭ, прочность, несущая способность, LVL.

ASSESSMENT OF THE LOAD-BEARING CAPACITY OF HORIZONTAL LVL STRUCTURES USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Kotova Elizaveta Vladimirovna[1], graduate student of the Department of Metal and Wooden Structures, **Danilov Egor Vladimirovich**[2], Ph.D., Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya str., 4, 190005, Russian Federation), [1] Elizaveta-Kotova_2000@mail.ru, [2]sleepme@mail.ru

Abstract. In this paper, we consider the numerical modeling of the load-bearing capacity of horizontal structures made of laminated veneer wood (LVL). The purpose of the study is to create a reliable computational model capable of accurately reflecting the behavior of the structure under various types of loads. The study is based on the consideration of the physical and mechanical features of LVL, including anisotropy and heterogeneity of the material structure. Special attention is paid to the influence of the geometric parameters of the elements on the strength characteristics. The finite element method was used for the analysis, which makes it possible to identify the features of the stress-strain state of the structure in real-world operating conditions. The simulation results are correlated with the provisions of regulatory documents. The work is aimed at improving the accuracy of design calculations, improving operational characteristics and ensuring structural reliability while optimizing material costs.
Keywords: horizontal structures, FEM, strength, bearing capacity, LVL.

Введение

Кружальные конструкции из ламинированной шпоновой древесины (LVL) в последние годы активно применяются в гражданском и промышленном строительстве благодаря высокой несущей способности, устойчивости к деформациям, экологичности и технологичности материала [1, 2, 3]. Особенно востребованы такие элементы при создании архитектурных и инженерных решений со сложной геометрией и большими пролетами. В то же время точное определение их прочностных характеристик представляет собой актуальную научно-практическую задачу в связи с выраженной анизотропией и неоднородностью структуры LVL [4], а также высокой чувствительностью изогнутых элементов к геометрическим отклонениям и локальным концентрациям напряжений [5, 6, 7].

Настоящее исследование направлено на численный анализ напряжённо-деформированного состояния кружальных конструкций из LVL с учетом

реальных физико-механических свойств материала и особенностей их пространственной формы. В качестве основного инструмента использован метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий смоделировать работу конструкции в различных эксплуатационных условиях и с высоким уровнем точности оценить её несущую способность. Особое внимание уделяется влиянию геометрических параметров, включая радиус кривизны и толщину элемента, на характер напряжений и деформаций в конструкциях.

Полученные в ходе моделирования результаты сопоставляются с нормативными требованиями и могут быть использованы при разработке проектных решений, направленных на повышение надежности и ресурса LVL-конструкций, а также оптимизацию расхода материалов и снижение стоимости строительства.

Методика проведения численного исследования и численный эксперимент

В рамках численного исследования была проведена серия расчётов напряжённо-деформированного состояния криволинейных арочных элементов, изготовленных из ламинированной шпоновой древесины (LVL) [8]. Основное внимание уделялось анализу влияния двух ключевых факторов: радиуса кривизны арки и угла ориентации волокон относительно оси конструкции

Численный анализ кружальных конструкций из ламинированной шпоновой древесины (LVL) выполнен с использованием метода конечных элементов, реализованного в специализированном программном комплексе SCAD. Методика моделирования разработана с учетом особенностей физико-механических свойств LVL и конструктивной геометрии изогнутых элементов.

В вычислительной программе формировалась трехмерная геометрическая модель криволинейного элемента кружальной конструкции с разными радиусами кривизны, равными 1000 мм, 1500 мм, 2000 мм и углами наклона волокон – 0°, 30°, 45°, 60°. LVL материал моделировался как ортотропный материал с поперечным сечением 39×100 мм с различными модулями упругости, коэффициентами Пуассона и модулями сдвига в продольном, радиальном и тангенциальном направлениях. Значения характеристик определялись на основе лабораторных испытаний [9, 10]. Расчетная схема представлена на рисунке 1.

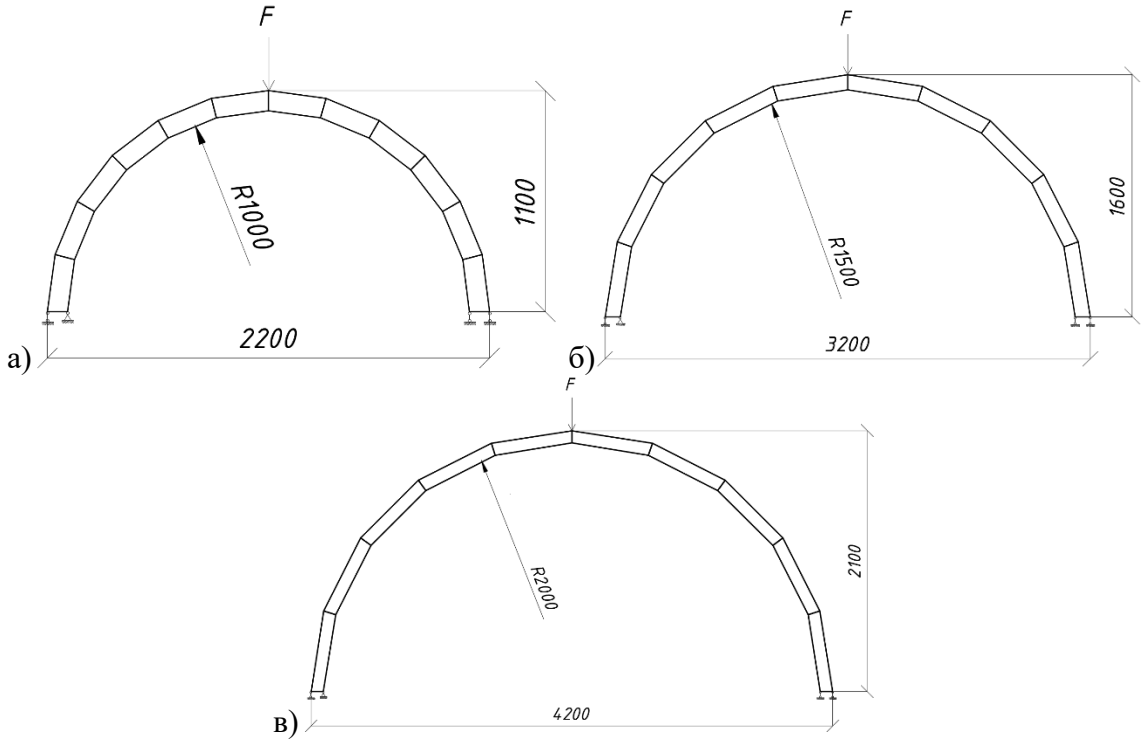


Рис.1. Расчетная схема: а) при радиусе кривизны 1000 мм; б) при радиусе кривизны 1500 мм; в) при радиусе кривизны 2000 мм

Анализ полученных результатов численного исследования

В ходе численного эксперимента на изгиб были получены детализированные поля распределения напряжений, отражающие особенности работы конструкции при различных комбинациях геометрических и материаловедческих параметров. Схема распределения напряжений показана на рисунке 2.

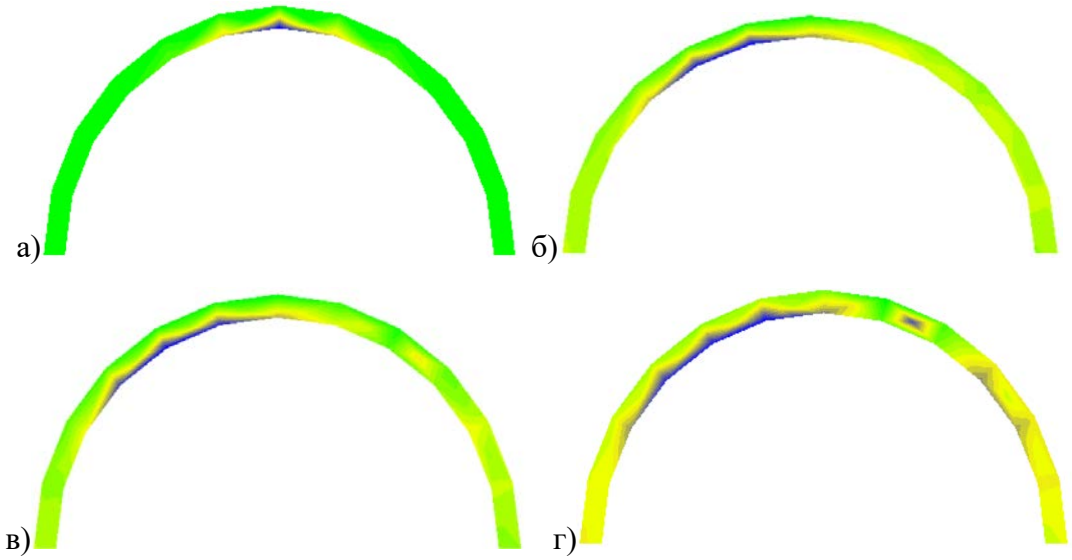


Рис. 2. Схемы распределения напряжений в криволинейной арки: а) при α=0°, б) при α=30°, в) при α=45°, г) при α=60°

Полученные в ходе численного моделирования результаты были сопоставлены с нормативными значениями предельно допустимых напряжений при растяжении для LVL-материала, составляющими 0,45 МПа. Расчётные данные приведены в таблице1. Значения, превышающие данный предел, выделены красным цветом и указывают на наличие опасных участков в зоне растягивающих напряжений, потенциально подверженных разрушению при эксплуатации.

Таблица 1. Результаты численного расчета криволинейной арки из LVL в зависимости от угла наклона волокон и радиуса кривизны

Угол наклона волокон	**Напряжение, МПа**				
При радиусе кривизны – 1000 мм					
	2кН	**4кН**	**6кН**	**8кН**	**10кН**
0°	0,04	0,08	0,12	0,16	0,2
30°	0,16	0,33	0,45	0,67	0,82
45°	0,27	0,46	0,69	0,93	1,14
60°	0,24	0,45	0,68	0,92	1,12
При радиусе кривизны – 1500 мм					
0°	0,04	0,09	0,13	0,17	0,23
30°	0,17	0,37	0,51	0,70	0,91

Продолжение таблицы 1

45°	0,42	0,59	0,85	1,17	1,27
60°	0,37	0,55	0,79	1,09	1,19
При радиусе кривизны – 2000 мм					
0°	0,04	0,10	0,13	0,18	0,25
30°	0,17	0,40	0,52	0,72	1,00
45°	0,46	0,73	1,01	1,40	1,40
60°	0,40	0,66	0,91	1,26	1,26

В связи с этим, для обеспечения требуемого уровня надёжности и эксплуатационной безопасности конструкции рекомендуется применение усиленных проектных решений, в частности:

- увеличение количества несущих слоёв в составе LVL-балки;
- либо локальное армирование/усиление в зонах максимальной концентрации напряжений, выявленных в ходе моделирования.

Такие меры позволяют повысить общий запас прочности конструкции и снизить риск возникновения хрупких разрушений в зонах растяжения.

Анализ результатов показал, что как уменьшение радиуса кривизны, так и отклонение волокон от направления действия основной нагрузки приводят к перераспределению внутренних усилий и локальному возрастанию напряжений в зонах криволинейного изгиба. Это особенно ярко выражено при углах ориентации волокон 45° и 60°, где напряжения стремительно приближаются к предельным значениям материала, даже при умеренных

нагрузках. График зависимости нагрузки от угла наклона волокон представлен на рисунке 3.

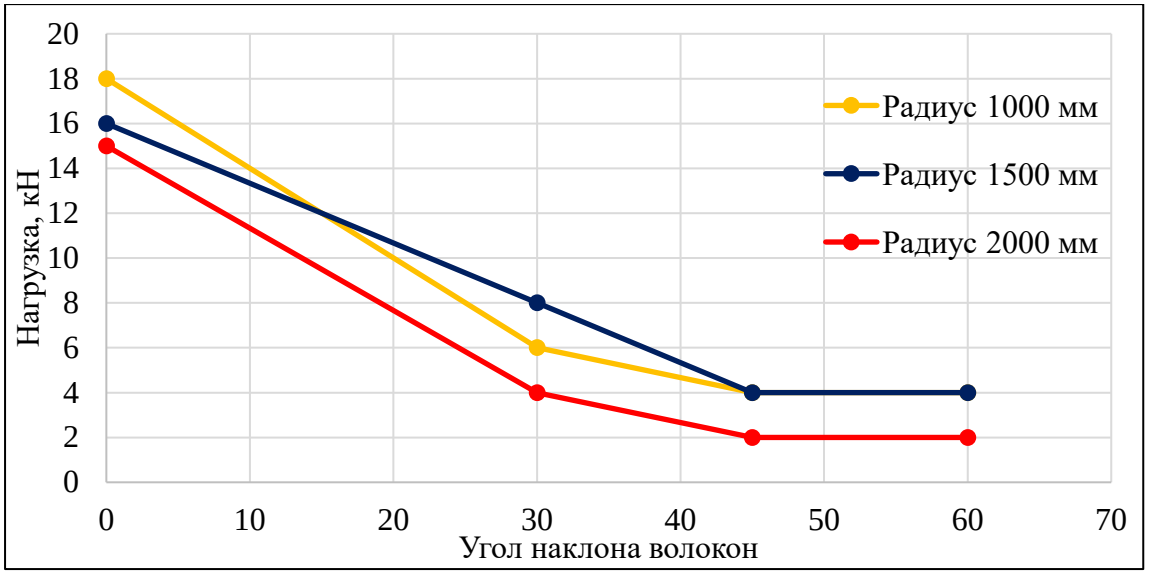


Рис. 3. График зависимости нагрузки от угла наклона волокон

Таким образом, проведённый расчёт позволил выявить характерные закономерности формирования напряжений в криволинейных LVL-конструкциях и определить критические сочетания радиуса и угла наклона волокон, при которых конструкция теряет запас прочности. Полученные данные служат основой для дальнейшей оптимизации геометрических параметров и ориентации слоёв материала с целью обеспечения требуемой несущей способности и надёжности конструкции.

Вывод

Проведено численное исследование криволинейных LVL-образцов при сосредоточенной нагрузки и при различных геометрических параметров. Проведённый расчёт позволил выявить характерные закономерности формирования напряжений в криволинейных LVL-конструкциях и определить критические сочетания радиуса и угла наклона волокон, при которых конструкция теряет запас прочности. Полученные данные служат основой для дальнейшей оптимизации геометрических параметров и ориентации слоёв материала с целью обеспечения требуемой несущей способности и надёжности конструкции.

Список литературы

1. Шмидт А.Б. Исследование работы криволинейных участков большой кривизны в клеевых деревянных конструкциях. Автореферат канд.дис. ЛИСИ, Л., 1980.

2. Лебедев Ю.С., Темнов В.Г. Пространственные конструктивные системы бионического типа: опыт применения в строительстве. Л.: ЛДНТП, 1980. 26 с

3. Дмитриев И.К. Исследование работы традиционной кружальной арки с вариантом ее усиления/ Строительство и реконструкция, 2020. - №4. – с 29-37

4. Лехницкий С.Г. «Теория упругости анизотропного тела», Наука 1977

5. Юдашев А.Х. Особенности работы клееных деревянных конструкций в условиях чистого изгиба//Вопросы науки и образования, 2019. -№8(20).

6. Дмитриев И.К. Исследование работы стержне-вантовой гирлянды //Промышленное и гражданское строительство. 2010. №11. С. 53 - 55

7. Дмитриев И.К. Экспериментальное исследование арочной гирлянды //Промышленное и гражданское строительство. 2014. №10. С. 58 – 61

8. ЦНИИСК им. Кучеренко В.А. Деревообрабатывающая промышленность/ЛВЛ высокопрочный многослойный брус, 1952 – 52 с.

9. Папулова И. Е. Механические свойства и испытания древесины: учебное пособие/ И. Е. Папулова. – Киров: ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2014. – 85 с.

10. Леонтьев Н.Я. Техника испытания древесины. – М: Лесн. пром-сть, 1970. 469 с.

УДК 691.32

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ ПРИ ВЯЗКОУПРУГОМ ПОВЕДЕНИИ МЕТОДАМИ ЧИСЛЕННОЙ ГОМОГЕНИЗАЦИИ

Кравченко Валентин Викторович, к.т.н., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов

Брестский государственный технический университет (г. Брест, ул. Московская, 267, 224017, Республика Беларусь), vvkravchenko@g.bstu.by

Аннотация. В настоящее время для прогнозирования жесткостных характеристик бетонного композита преобладает феноменологический подход, основанный на экспериментальных данных. В рамках научно-обоснованного похода наиболее распространены методы, основанные на аналитической гомогенизации, в которых для упрощения вычислений принято допущение, что на всех гетерогенных уровнях бетонного композита все его фазы обладают сферической формой и упругим поведением, что не в полной соответствует структуре цементного камня, являющейся ключевой фазой бетонного композита. В статье рассмотрены основные принципы совершенствования существующего подхода к определению эффективных жесткостных характеристик гетерогенной структуры цементного камня методами численной гомогенизации, позволяющие учитывать реальную

геометрическую форму частиц фазы продуктов гидратации и их вязкоупругое поведение.

Ключевые слова: цементный камень, вязкоупругость, гомогенизация, конечно-элементный анализ, преобразование Фурье.

NUMERICAL HOMOGENIZATION FOR MODELLING THE EFFECTIVE STIFFNESS CHARACTERISTICS OF VISCOELASTIC CEMENT PASTE

Kravchenko Valentin Victorovich, Ph.D., Associate Professor of the Department of Concrete Technology and Building Materials

Brest State Technical University (Brest, Moskovskaya street, 267, 224017, Republic of Belarus), vvkravchenko@g.bstu.by

Abstract. Currently, a phenomenological approach based on experimental data is dominated to predict the effective stiffness characteristics of concrete. The scientific approach is based on analytical homogenization methods, which, to simplify calculations, assume that all phases at heterogeneous levels of concrete have a spherical shape and elastic behavior. These considerable assumptions do not fully apply to the structure of cement paste, which is a crucial phase of concrete. The article presents the basic principles of a more efficient approach to homogenization of a heterogeneous structure of cement paste using numerical homogenization for considering the real geometric shape of the particles of the hydration product phase under viscoelastic behavior.

Keywords: cement paste; viscoelastic; homogenization; finite-element analyses; Fourier transform.

Введение

Основными характеристиками бетона являются его механические характеристики, к которым относят жесткостные характеристики (модуль упругости Юнга, коэффициент Пуассона, модуль сдвига и т.д.), необходимые для определения деформационных свойств, например, собственных деформаций таких как усадка и ползучесть. В настоящее время для их прогнозирования широко используют феноменологический подход, обладающий рядом существенных недостатков.

Формулирование научно-обоснованного подхода к прогнозированию жесткостных характеристик бетона является одной из приоритетных и в тоже время сложных проблем в современной теории бетоноведения.

Структуру бетона можно представить в виде цементной матрицы с распределенными в ней включениями в виде зерен заполнителя. Основная сложность при исследовании бетона заключается в том, что цементная матрица (называемая в технической литературе – цементным камнем) сама по

себе является поликристаллическим композитным материалом, количественный состав фаз которого постоянно изменяется в процессе гидратации.

Другой важной особенностью цементного камня является то, что его ключевая фаза – гидросиликат кальция обладает ярко выраженным вязкоупругим поведением, что является основной предполагаемой причиной ползучести в цементных композитах. Напряженно-деформированное состояние при таком поведении описывают интегралом Стилтьеса (1) [1], который не может быть вычислен аналитически.

$$\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \int_0^t \mathbb{J}(t,t') : d\boldsymbol{\sigma}(t') \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$ – тензор деформаций 2 ранга в момент времени t; $\mathbb{J}(t,t')$ – тензор податливости 4 ранга в момент времени t от воздействия, приложенного в момент времени t'; $\boldsymbol{\sigma}(t')$ – тензор напряжений 2 ранга в момент времени t'.

Основным подходом к определению эффективных характеристик таких сложных композитных систем основан на их многоуровневом иерархическом представлении, по которому структуру композита рассматривают на элементарных гетерогенных уровнях, состоящих из фаз, как правило, с характерными физико-механическими и (или) геометрическими характеристиками. Количество и состав элементарных гетерогенных уровней определяют из анализа структуры композита, с последующей передачей информации от нижележащего гетерогенного уровня к вышележащему [2].

Применительно к бетонному композиту его структуру можно разделить на два гетерогенных уровня: цементный камень и бетонный композит в целом, что подразумевает для определения жесткостных характеристик бетонного композита, вначале необходимо определить жесткостные характеристики цементного камня.

Характеристики композитов на каждом гетерогенном уровне определяют методами гомогенизации, суть которых заключается в определении усредненных, так называемых, эффективных характеристик композита, которые, в настоящее время, условно разделены на два основных направления аналитическую [3, 4] и численную гомогенизацию [5, 6].

Аналитическая гомогенизация основана на предположении о том, что деформации на микро- и макроуровне репрезентативного объема связаны между собой посредством линейной зависимости (2) [4]:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_r = \mathbb{A}_r : \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle_\Omega \qquad (2)$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}_r$ – тензор 2 ранга деформаций r–ой фазы ($r = 1,2,\ldots,n$); $\mathbb{A}_r$ – тензор 4 ранга концентрации деформаций r–ой фазы; $\langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle_\Omega$ – тензор 2 ранга усредненных деформаций в репрезентативном (представительном) объеме Ω,

определяемый как $\langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle_{\Omega} = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}_r d\Omega$; « : » – двойное скалярное произведение (свертка) тензоров.

Такое предположение позволяет в конечном итоге получить довольно простую аналитическое выражение (3) для определения эффективного тензора жесткости (В ряде литературных источников называемого тензором упругих констант или коэффициентов) ($\mathbb{C}_{eff}$) [4]:

$$\mathbb{C}_{eff} = \sum_r f_r \, \mathbb{C}_r : \left[\mathbb{A}_r : \left(\sum_r f_r \, \mathbb{A}_r \right)^{-1} \right] \qquad (3)$$

где $\mathbb{C}_r$ – тензор жесткости 4 ранга r–ой фазы; f_r – объемное содержание (концентрация) r–ой фазы в репрезентативном объеме.

В наиболее распространенных моделях аналитической гомогенизации (например, Mori-Tanaka Model и Self-Consistent Model) тензор концентрации деформаций ($\mathbb{A}_r$) определяют из решения задачи Эшелби для эллипсоидного упругого включения (англ.–Eshelby's inclusion problem).

Основные преимущества методов аналитической гомогенизации – простые аналитические зависимости при условии, что все включения в репрезентативном объеме обладают сферической формой. В тоже время им присущи и существенные недостатки:

1) Реальную форму включений заменяют на правильную геометрическую форму в виде сферы или эллипсоида, при этом в некоторых случаях существенно усложняется определение эффективного тензора жесткости для эллипсоидных включений (необходимо учитывать функцию распределения ориентаций эллипсоидов и выполнять усреднение тензора концентрации напряжений посредством двойного интегрирования в сферических координатах, выполняемого численными методами [7]);

2) Необходимо использовать операционное исчисление для нелинейного поведения, описываемого интегралом Стилтьеса (как правило, используют преобразование Лапласа, для которого необходимы численные алгоритмы для получения оригинала по изображению [8]).

Учитывая, что цементный камень обладает чрезвычайно сложной неоднородной структурой, в которой частицы твердой фазы, состоящей из зерен цемента и продуктов гидратации, образуют включения произвольной геометрической формы, распределяемые в его объеме случайным образом, наиболее подходящими для определения жесткостных характеристик цементного камня являются методы численной гомогенизации, к которым относят: метод на основе конечно-элементного анализа (англ.–FEA) [5] и метод на основе быстрого преобразования Фурье (англ.–FFT) [6], позволяющие решить указанные недостатки.

Методы

Для определения эффективного тензора жесткости в теории гомогенизации используют определяющее соотношение (4) [4].

$$\langle \boldsymbol{\sigma} \rangle_{\Omega} = \mathbb{C}_{\boldsymbol{eff}} : \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle_{\Omega} \tag{4}$$

где $\langle \boldsymbol{\sigma} \rangle_{\Omega}$ – тензор 2 ранга усредненных напряжений в репрезентативном объеме, определяемый аналогично как для усредненного тензора деформаций.

В основе методов численной гомогенизации лежит принцип декомпозиции тензора деформаций ($\boldsymbol{\varepsilon}$) на две составляющие, приведенные в выражении (5) [9].

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{x}) = \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} + \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}(\tilde{\boldsymbol{u}}(\boldsymbol{x})) \tag{5}$$

где $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$ – тензор 2 ранга макроскопических деформаций, постоянных в любой точке репрезентативного объема; $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}$ – тензор 2 ранга микроскопических деформаций, обусловленных периодическими локальными флуктуациями $\tilde{\boldsymbol{u}}$, возникающих в репрезентативном объеме вследствие неоднородности фаз; $\boldsymbol{x}$ – радиус-вектор произвольной точки в репрезентативном объеме.

Существенным отличием численной гомогенизации от аналитической является представление репрезентативного объема не в декларативном виде, а в виде пространственно-структурной модели, что подразумевает, помимо данных об объемном содержании и жесткостных характеристиках фаз, должно быть известно их пространственное распределение в репрезентативном объеме.

Наиболее подходящей пространственно-структурной моделью цементного камня, с точки зрения его структуры, является дискретная воксельная модель (англ.–voxel-based model) [10]. Основным ее преимуществом является возможность воспроизводить произвольную геометрическую форму фаз с их произвольным пространственным размещением в заданном объеме.

Для гомогенизации на основе конечно-элементного анализа воксельная модель цементного камня позволяет относительно легко сгенерировать кончено-элементную сетку, поскольку каждый воксел может быть преобразован в шестигранный восьмиузловой изопараметрический конечный элемент (англ.– hexahedron) с тремя степенями свободы в каждом узле при определении перемещений и одной степенью свободы при определении напряжений.

Вариационная (слабая) формулировка (6) для данного метода может быть получена из принципа возможных перемещений.

$$A(\tilde{\boldsymbol{u}}, \delta\tilde{\boldsymbol{u}}) = L(\delta\tilde{\boldsymbol{u}}) + L^{S}(\delta\tilde{\boldsymbol{u}}); \quad \forall(\tilde{\boldsymbol{u}}, \delta\tilde{\boldsymbol{u}}) \in H^{1}(\Omega) \tag{6}$$

Билинейная форма вариационной постановки представлена в выражении (7), линейная форма – в выражении (8).

$$A(\tilde{\boldsymbol{u}}, \delta\tilde{\boldsymbol{u}}) = \int_{\Omega} \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}(\tilde{\boldsymbol{u}}) : \mathbb{C}(\boldsymbol{x}) : \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}(\delta\tilde{\boldsymbol{u}}) d\Omega \tag{7}$$

$$L(\delta\tilde{\boldsymbol{u}}) = -\int_{\Omega} \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} : \mathbb{C}(\boldsymbol{x}) : \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}(\delta\tilde{\boldsymbol{u}}) d\Omega \tag{8}$$

где $\mathbb{C}$ – тензор жесткости 4 ранга, определяемый из выражения (9).

$$\mathbb{C}(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} \mathbb{C}_c & \forall x \in \Omega_c \\ \left(\mathbb{J}_{i,i-1/2}\right)^{-1} & \forall x \in \Omega_{hp} \\ \mathbb{C}_w & \forall x \in \Omega_w \\ \mathbb{C}_a & \forall x \in \Omega_a \end{cases} \tag{9}$$

где Ω_c, Ω_{hp}, Ω_w, Ω_a – подобласти конечно-элементной сетки, соответствующие фазам негидратированного цемента, продуктов гидратации, воды и воздуха; i–ый временной интервал анализируемого периода времени t; $i - 1/2$ – середина i–го временного интервала.

Граничными условиями при решении указанной задачи являются периодические граничные условия.

Поскольку фаза продуктов гидратации обладает нелинейным поведением, описываемым интегралом Стилтьеса, для решения этой задачи можно определить еще одну линейную форму (10), в которой интеграл Стилтьеса представлен в численном виде, используя метод трапеций:

$$\begin{gathered} L^S(\delta\tilde{\boldsymbol{u}}) = -\int_{\Omega} \left(\boldsymbol{\sigma}_{i-1} + (\boldsymbol{\varepsilon}_{i-1} + \boldsymbol{h}) : \mathbb{J}_{i,i-1/2}^{-1}\right) : \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}(\delta\tilde{\boldsymbol{u}})\, d\Omega \\ \boldsymbol{h} = \sum_{j=1}^{i-1} \left[\left(\mathbb{J}_{i,j-1/2} - \mathbb{J}_{i-1,j-1/2}\right) : \Delta\boldsymbol{\sigma}_j\right] \end{gathered} \tag{10}$$

Необходимо отметить, что указанная линейная форма определена только для подобласти конечно-элементной сетки, соответствующей фазе продуктов гидратации.

Для гомогенизации на основе преобразования Фурье кроме декомпозиции тензора деформаций, выполняют декомпозицию тензора напряжений также на две составляющие, приведенную в выражении (11).

$$\boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{x}) = \mathbb{C}_0 : \boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{x}) \tag{11}$$

где $\mathbb{C}_0$ – тензор жесткости 4 ранга некоторой однородной среды; $\boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{x})$ – поляризационный тензор 2 ранга, выражаемый как $\boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{x}) = [\mathbb{C}(\boldsymbol{x}) - \mathbb{C}^0] : \boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{x})$, соответствующий напряжениям, возникающим вследствие неоднородности среды.

Основываясь на дифференциальных уравнениях равновесия теории упругости, используя функцию Грина, а также вышеуказанное выражение декомпозиции (11), получают интегральное уравнение (12) для нахождения тензора деформаций, известное как уравнение Липпманна-Швингера [11].

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{x}) = \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} - \mathbb{\Gamma}_0(\boldsymbol{x}) * \boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{x}) \tag{12}$$

где $\mathbb{\Gamma}_0$ – оператор (тензор 4 ранга) Грина, зависящий от $\mathbb{C}_0$; « $*$ » – операция свертки функций.

Уравнение (12) представляет собой нелинейное интегральное уравнение, поэтому, во-первых, его линеаризуют одним из итерационных методов, например, методом простой итерации, приведенным в выражении (13).

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{k+1}(\boldsymbol{x}) = \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} - \mathbb{\Gamma}_0(\boldsymbol{x}) * [(\mathbb{C}(\boldsymbol{x}) - \mathbb{C}_0) : \boldsymbol{\varepsilon}^k(\boldsymbol{x})];\ \ \boldsymbol{\varepsilon}^0 = \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} \tag{13}$$

Во-вторых, поскольку в уравнении (12) присутствует операция свертки функций, для решения этой задачи целесообразно использовать преобразование Фурье (14), поскольку рассматриваемое поле деформаций включает периодическую компоненту. На практике для этого используют алгоритм быстрого преобразования Фурье.

$$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{k+1}(\boldsymbol{w}) = \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} - \hat{\mathbb{\Gamma}}_0(\boldsymbol{w}) : \hat{\boldsymbol{\tau}}^k(\boldsymbol{w}) \tag{14}$$

где $\boldsymbol{w}$ – частота в пространстве Фурье.

Нелинейная постановка задачи в данном методе (15), может быть решена посредством преобразования исходного выражения для поляризационного тензора, включением в него численного представления интеграла Стилтьеса, выраженного методом трапеций.

$$\begin{gathered} \boldsymbol{\tau}_i^k = \boldsymbol{\sigma}_i^k - \mathbb{C}_0 : \boldsymbol{\varepsilon}_i^k = \boldsymbol{\sigma}_{i-1} + \Delta\boldsymbol{\sigma}_i^k - \mathbb{C}_0 : \boldsymbol{\varepsilon}_i^k;\ \ \boldsymbol{\sigma}_0 = 0;\ \ \boldsymbol{\varepsilon}_i^{\boldsymbol{0}} = \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} \\ \Delta\boldsymbol{\sigma}_i^k = \left[\boldsymbol{\varepsilon}_i^k - \boldsymbol{\varepsilon}_{i-1} - \sum_{j=1}^{i-1}\left(\mathbb{J}_{i,j-1/2} - \mathbb{J}_{i-1,j-1/2}\right) : \Delta\boldsymbol{\sigma}_j\right] : \left(\mathbb{J}_{i,i-1/2}\right)^{-1},\ \boldsymbol{\varepsilon}_0 = 0 \end{gathered} \tag{15}$$

Результаты и обсуждение

Каждый из описанных методов численной гомогенизации позволяет решить задачу гомогенизации гетерогенной структуры цементного камня, учитывая нелинейное поведение фазы продуктов гидратации.

Отличительной особенностью метода на основе конечно-элементного анализа являются:

1) Необходимость в регенерации конечно-элементной сетки на каждом временном шаге;

2) Высокая вычислительная сложность $O(N^2)$ сборки глобальной матрицы жесткости и вектора узловой нагрузки;

3) Неизвестными в вариационной постановке являются узловые перемещения (24 степени свободы на конечный элемент), что обуславливает большую размерность получаемых СЛАУ, что накладывает определенные требования к необходимому количеству памяти;

3) Применение специальных методов для создания периодических граничных условий (наиболее часто используемый для этого метод множителей Лагранжа приводит к увеличению размерности глобальной матрицы жесткости и вектора узловой нагрузки);

4) Историю напряжений необходимо хранить в виде значений, интерполированных на точки интегрирования для каждого конечного элемента (это как правило, 8 квадратурных точек на конечный элемент).

Отличительной особенностью метода на основе преобразования Фурье являются:

1) Воксельная модель структуры преобразуется в многомерный числовой массив, поэтому необходимость в конечно-элементной сетке отсутствует;

2) Неизвестными в уравнении Липпманна-Швингера являются компоненты тензора деформаций, а не перемещений, что обуславливает меньший размер используемых числовых массивов;

3) Не требуется специальных методов для создания периодических граничных условий;

4) Сложность алгоритма быстрого преобразования Фурье $O(N \cdot \log N)$;

5) Скорость сходимости уравнения Липпмана–Швингера сильно зависит от характеристик жесткости однородной среды, задаваемых предварительно на начальном этапе. Кроме того, на сходимость уравнения влияет контраст (разница) между жесткостными характеристиками фаз, сильный контраст в некоторых случаях может привести к отсутствию сходимости уравнения (например, отсутствие сходимости может происходить на начальном этапе гидратации, когда в дискретной структуре преобладает большое количество вокселов воды и цемента, имеющих существенную разницу в жесткостных характеристиках).

Численная гомогенизация является одним из направлений совершенствования существующего научно-обоснованного подхода к определению жесткостных характеристик цементных композитов, основанного на методах аналитической гомогенизации, обладающего рядом существенных недостатков.

Выводы

Представлены основные принципы гомогенизации жесткостных характеристик гетерогенной структуры цементного камня методами численной гомогенизации, учитывающие произвольную геометрическую форму частиц твердой фазы, распределяемых в его объеме случайным образом, и обладающих нелинейным поведением, что позволяет

усовершенствовать существующие положения, основанные на методах аналитической гомогенизации в рамках научно-обоснованного подхода.

Список использованной литературы

1. Bažant Z. P., Jirásek M. Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures. Springer Dordrecht, 2018. 918 P. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-024-1138-6.

2. Bernard O., Ulm F.-J., Lemarchand E. A multiscale micromechanics-hydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials // Cement and Concrete Research. 2003. № 33(9). P. 1293–1309. DOI: https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00039-5.

3. Dvorak G. J. Micromechanics of Composite Materials. Springer Science & Business Media, 2012. 460 P. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-4101-0.

4. Zaoui, A. Continuum micromechanics: survey // Journal of Engineering Mechanics. 2002. № 128(8). P. 808–816. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2002)128:8(808).

5. Yvonnet J. Computational Homogenization of Heterogeneous Materials with Finite Elements. New York, 2019. 223 P. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-18383-7.

6. Lucarini, S. FFT based approaches in micromechanics: fundamentals, methods and applications // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 2021. № 30(22). P. 1–97. DOI: https://doi.org/10.1088/1361-651X/ac34e1.

7. Sangryun L., Ryu S. Theoretical study of the effective modulus of a composite considering the orientation distribution of the fillers and the interfacial damage // European Journal of Mechanics - A/Solids. 2018. № 72. P. 79–87. DOI: https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2018.02.008.

8. Scheiner S., Hellmich C. Continuum Microviscoelasticity Model for Aging Basic Creep of Early-Age Concrete // Journal of Engineering Mechanics. 2009. № 135(4). P. 307–323.

9. Michel J. C., Moulinec H., Suquet P. Effective properties of composite materials with periodic microstructure: a computational approach // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1999. № 172(1-4). P. 109–143. DOI: https://doi.org/10.1016/S0045-7825(98)00227-8

10. Кравченко В. В. Моделирование микроструктуры цементного камня на основе воксельной модели // Вестник БрГТУ. 2024. № 1(133). С. 14–18. DOI: https://doi.org/10.36773/1818-1112-2024-133-1-14-18.

11. Moulinec H., Suquet P., A numerical method for computing the overall response of nonlinear composites with complex microstructure // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1998. № 157(1-2), P. 69–94. DOI: https://doi.org/10.1016/S0045-7825(97)00218-1.

УДК 691-4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ АРМИРУЮЩИМ СТЕКЛОВОЛОКНОМ

Крюков Алексей Витальевич[*], аспирант кафедры строительных конструкций, **Лисятников Михаил Сергеевич**, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций, **Рощина Светлана Ивановна**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой строительных конструкций

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), kryukovaleks3y@yandex.ru.

Аннотация. В строительной отрасли актуальна задача модификации существующих деревянных конструкций для увеличения срока службы, повышения несущей способности и соответствия современным стандартам безопасности. Наряду с традиционными методами, перспективным является использование древесно-полимерных композитов (ДПК), сочетающих в себе преимущества дерева и полимеров. Данное исследование посвящено разработке эффективных и экономичных методов усиления деревянных конструкций, особенно решетчатых, с сохранением их исторической ценности и адаптацией к современным нагрузкам. Решетчатые конструкции, состоящие из стержней, испытывают преимущественно растягивающие или сжимающие нагрузки. Целью работы является разработка методов модификации деревянных решетчатых конструкций, для чего было проведено экспериментальное исследование прочности полимерных препрегов на основе эпоксидной смолы и стеклоткани — материалов, применяемых для усиления. Была сформирована серия опытных образцов с варьируемыми параметрами для обеспечения статистической значимости результатов. Полученные данные станут основой для разработки технологии усиления деревянных конструкций с использованием композиционных материалов, которая обеспечит повышение их надежности и долговечности.

Ключевые слова: деревянные конструкции; решетчатые конструкции; модификация; усиление; древесно-полимерные композиты (ДПК); полимерные композиты; эпоксидные препреги; стекловолокно; прочностные характеристики; экспериментальное исследование; строительная индустрия; реконструкция.

INVESTIGATION OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF POLYMER COMPOSITES, MODIFIED WITH REINFORCING GLASS FIBER

Kryukov Alexey Vitalievich*, Postgraduate Student of the Department of Building Structures, **Lisyatnikov Mikhail Sergeevich**, PhD, Associate Professor of the Department of Building Structures, **Roshchina Svetlana Ivanovna**, D.Sc., Prof., Head of the Department of Building Structures

Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov (Vladimir, Gorky str., 87, 600000, Russian Federation): kryukovaleks3y@yandex.ru.

Abstract. In the construction industry, the urgent task is to modify existing wooden structures to increase their service life, increase their load-bearing capacity and comply with modern safety standards. Along with traditional methods, the use of wood-polymer composites (WPC), combining the advantages of wood and polymers, is promising. This study is devoted to the development of effective and economical methods of reinforcing wooden structures, especially latticed ones, while preserving their historical value and adapting to modern loads. Lattice structures consisting of rods are mainly subjected to tensile or compressive loads. The aim of the work is to develop methods for modifying wooden lattice structures, for which an experimental study of the strength of polymer prepregs based on epoxy resin and fiberglass, materials used for reinforcement, was carried out. A series of prototypes with variable parameters was formed to ensure the statistical significance of the results. The data obtained will become the basis for the development of a technology for reinforcing wooden structures using composite materials, which will increase their reliability and durability.
Keywords: wooden structures; lattice structures; modification; reinforcement; wood-polymer composites (WPC); polymer composites; epoxy prepregs; fiberglass; strength characteristics; experimental research; construction industry; reconstruction.

Введение

В строительной отрасли наблюдается растущая потребность к развитию методов модификации существующих деревянных конструкций, позволяющим продлить срок их службы, повысить несущую способность и соответствовать современным требованиям безопасности [1]. Наряду с традиционными методами модификации и усиления деревянных решетчатых конструкций, применение древесно-полимерных композитов (ДПК) представляет собой перспективное направление, сочетающее в себе преимущества традиционных материалов и инновационных технологий [2,3]. Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью разработки эффективных и экономичных методов усиления существующих деревянных конструкций, позволяющих сохранить их историческую ценность, продлить срок эксплуатации и адаптировать к современным требованиям к нагрузкам. По принципу работы решетчатые конструкции представляют собой группу стержней, объединенных в определенную систему

таким образом, чтобы каждый его элемент воспринимал усилия растяжения или сжатия [4].

С целью разработки эффективных методов модификации деревянных решетчатых конструкций, направленных на повышение их несущей способности и эксплуатационных характеристик, было проведено экспериментальное исследование прочностных параметров полимерных препрегов на основе эпоксидного связующего, армированных стекловолоконными тканями. Для обеспечения статистической значимости полученных результатов была разработана серия опытных образцов, отличающихся двумя независимыми факторами варьирования, как показано в работе [5].

Объектом исследований являются композиционные материалы, представляющие собой двухфазные системы, состоящие из эпоксидной диановой смолы марки ЭД-20 в качестве полимерной матрицы, модифицированной армирующими волокнами стеклоткани.

Предмет исследования – оценка влияния плотности стеклоткани, используемой в качестве армирующего наполнителя, на предел прочности при растяжении армированных композиционных препрегов, полученных на основе вышеуказанной эпоксидной смолы.

Целью исследования является установление корреляции между плотностью стеклоткани и механическими характеристиками композиционного материала, что позволит оптимизировать состав и технологию изготовления препрегов для дальнейшего применения в создании дерево-полимерных композитах.

Материалы и методы

Для определения механических характеристик разработанных композиционных материалов, в частности предела прочности при растяжении, применялся метод экспериментальных исследований, регламентированный межгосударственным стандартом ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение».

Клеевая композиция изготавливалась из пропорций:

Эпоксидная смола ЭД-20.....100,

Отвердитель – полиэтиленполиамин 12,

Пластификатор – дибутилфталат .....20.

Точное процентное соотношение компонентов клеевой композиции тщательно контролировалось с помощью высокоточных лабораторных весов MICRO BALANCE SCALE MWP-3000.

Процесс смешивания компонентов клеевой композиции осуществлялся с помощью лабораторного перемешивающего устройства ЭКРОС-8300.

После приготовления клеевого состава осуществлялось формирование препрегов путем послойного нанесения клеевой композиции на стеклоткань, предварительно подготовленную и размещенную на плоской поверхности.

Важным этапом формирования препрегов было предотвращение образования воздушных включений (завоздушивания), которые могут выступать в качестве дефектов структуры и приводить к снижению прочности материала.

После завершения работ по формированию образцов было выдержано время до полной полимеризации клеевого состава (24 часа).

После завершения процесса полимеризации, обеспечивающего полное отверждение связующего и формирование монолитной структуры композиционного материала, препрегам были заданы равные геометрические формы, с габаритными размерами 30х10 сантиметров.

Экспериментальное определение механических характеристик разработанных композиционных материалов, а именно предела прочности при растяжении, осуществлялось с использованием универсальной испытательной машины модели РЭМ-600.



Рис. 1. Испытание образца в рамках исследования влияния плотности армирующего волокна на предел прочности образцов при осевом растяжении на испытательной машине РЭМ-600

С целью оценки влияния структурных особенностей армирующего наполнителя на механические свойства композиционного материала были подготовлены дополнительные образцы с использованием стеклоткани плотностью 600 г/м². В данном исследовании варьируемым параметром являлась ориентация волокон стеклоткани в структуре препрега, что позволяло оценить влияние анизотропии армирующего волокна на прочностные характеристики итогового образца. С целью изучения влияния ориентации волокон были использованы два типа стеклоткани:

- Стеклоткань с параллельным расположением волокон, характеризующаяся высокой степенью ориентации волокон в двух направлениях;

- Стекловолокно с хаотичным расположением волокон представляет собой нетканый материал, в котором волокна ориентированы случайным образом.



Рис. 2. Испытание образца в рамках исследования влияния анизотропии армирующей стеклоткани на предел прочности образцов при осевом растяжении на испытательной машине РЭМ-600

Для обеспечения сопоставимости результатов второй этап экспериментальных работ проводился с использованием той же технологической схемы, что и на первом этапе. Это включало использование тех же компонентов клеевой композиции

Результаты и обсуждение

Образец №1 с применением стеклоткани плотностью 100 г/м^2 показал среднее значение максимальной нагрузки при осевом растяжении равной 2.9 кН при максимальной деформации – 14.6 мм.

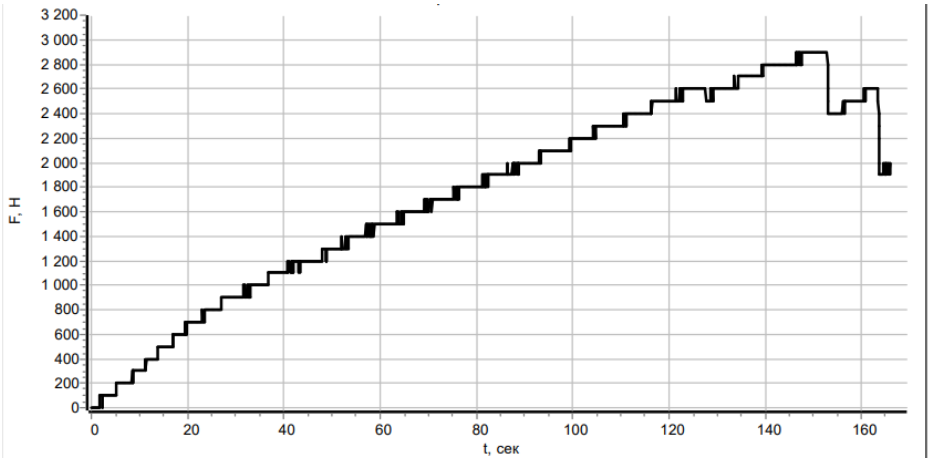


Рис. 3. Средние значения по результатам испытания опытных образцов с применением стеклоткани плотностью 100 г/м^2

Образец №2 с применением стеклоткани плотностью 200 г/м^2 - показал среднее значение максимальной нагрузки при осевом растяжении равной 3.8 кН при максимальной деформации – 11.7 мм.

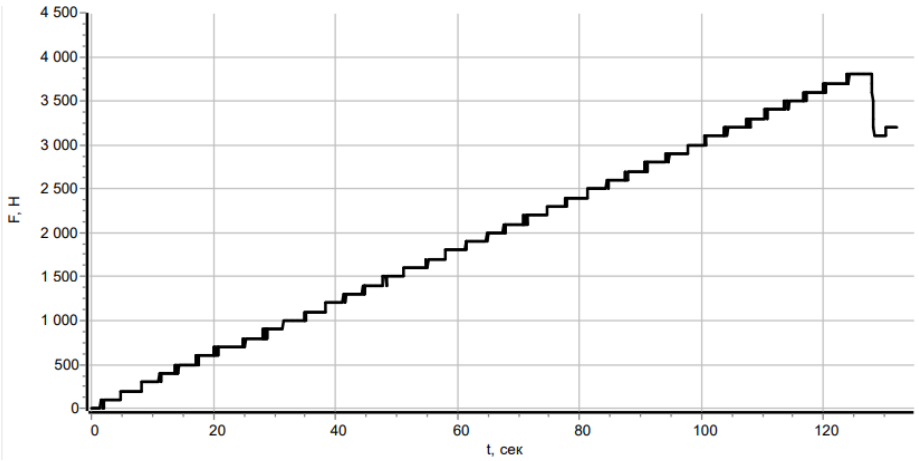


Рис. 4. Средние значения по результатам испытания опытных образцов с применением стеклоткани плотностью 200 г/м^2

Образец №3 с применением стеклоткани плотностью 260 г/м^2 - показал среднее значение максимальной нагрузки при осевом растяжении равной 4.7 кН при максимальной деформации – 15.3 мм.

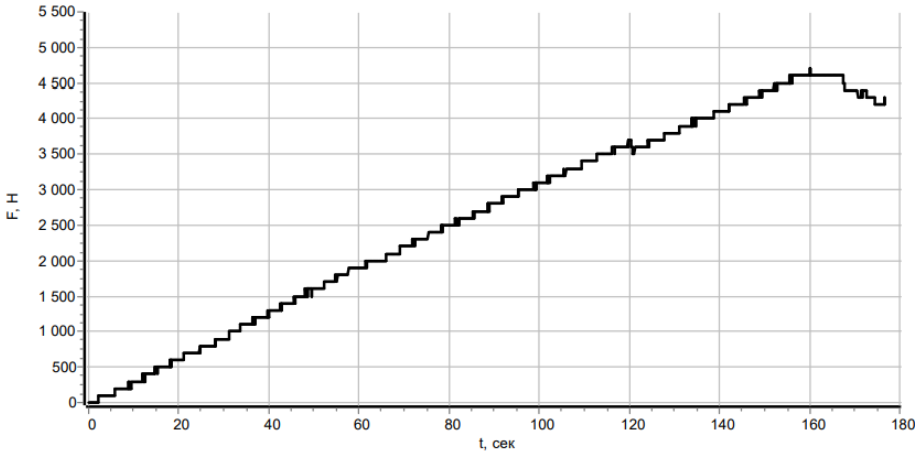


Рис. 5. Средние значения по результатам испытания опытных образцов с применением стеклоткани плотностью 260 г/м^2

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать однозначный вывод о наличии прямой зависимости между плотностью используемой стеклоткани и предельными характеристиками прочности при растяжении разработанного композиционного материала. Иными словами, увеличение поверхностной плотности стеклоткани, используемой в качестве армирующего наполнителя, приводит к пропорциональному увеличению значений предела прочности при растяжении композиционного препрега.

Образец №1 с применением стеклоткани, обладающей хаотичным расположением волокон – показал среднее значение максимальной нагрузки при осевом растяжении равной 12.2 кН при максимальной деформации – 10.2 мм.

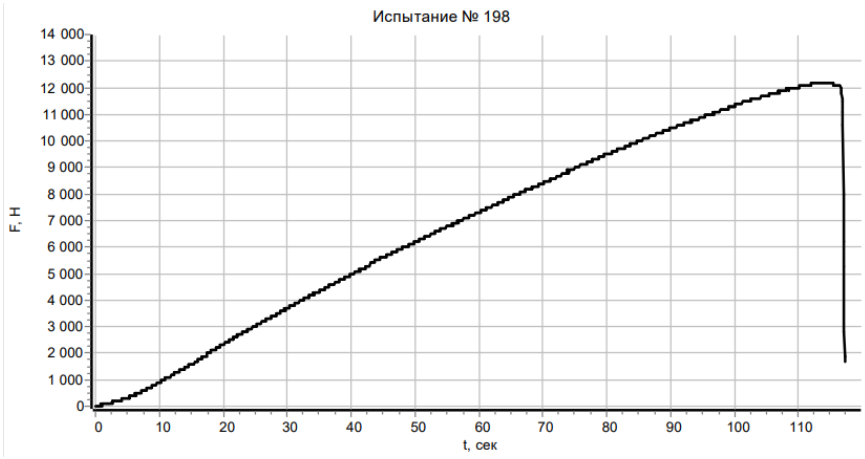


Рис. 6. Средние значения по результатам испытания опытных образцов с применением стеклоткани плотностью 600 г/м^2 с хаотичным расположением волокон

Образец №2 с применением стеклоткани, обладающей прямолинейным расположением волокон в две стороны – показал среднее значение максимальной нагрузки при осевом растяжении равной 10.1 кН при максимальной деформации – 8.8 мм.

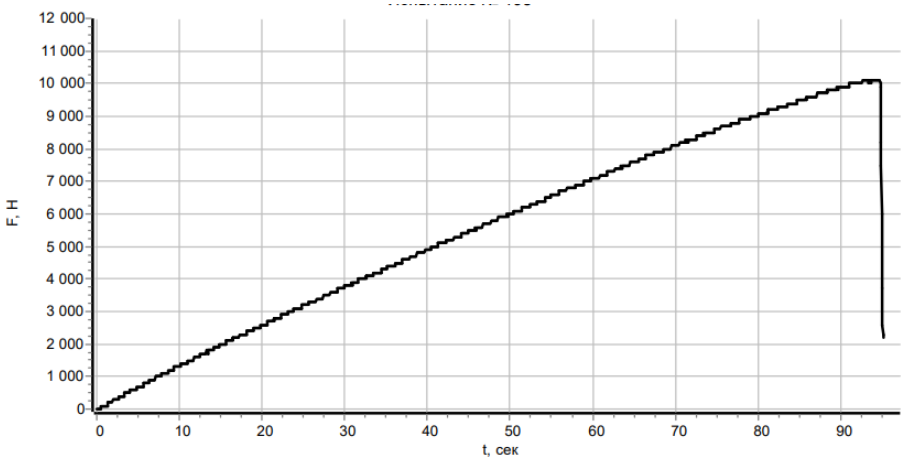


Рис. 7. Средние значения по результатам испытания опытных образцов с применением стеклоткани плотностью 600 г/м^2 с прямолинейным расположением волокон

Анализ результатов исследования влияния анизотропии армирующего волокна на механические свойства композиционного материала позволил установить, что применение стекловолокна с хаотичной ориентацией волокон обеспечивает более эффективное восприятие приложенной растягивающей нагрузки по сравнению с материалом, армированным стекловолокном с прямолинейной ориентацией. Это наблюдение может быть объяснено особенностями распределения напряжений в композиционном материале. В частности, хаотичная ориентация волокон способствует более равномерному распределению нагрузки по объему материала, в то время как при прямолинейной ориентации нагрузка концентрируется вдоль направления волокон, что может приводить к локальным перенапряжениям и преждевременному разрушению материала.

Выводы

На основании проведенных экспериментальных исследований и анализа полученных данных можно сформулировать следующие основные выводы:

- Экспериментально установлено, что увеличение плотности стеклоткани, используемой в качестве армирующего наполнителя в композиционном материале на основе эпоксидной смолы ЭД-20, приводит к пропорциональному увеличению значений предела прочности при растяжении. В частности, увеличение плотности стеклоткани от 100 г/м² (образец №1, 2,9 кН) до 260 г/м² (образец №3, 4,7 кН) сопровождалось значительным ростом максимальной нагрузки, воспринимаемой образцом, при осевом растяжении.

- Результаты исследования влияния анизотропии армирующего волокна показали, что применение стеклоткани с хаотичной ориентацией волокон (образец с хаотичным расположением волокон, 12,2 кН) обеспечивает более эффективное восприятие приложенной растягивающей нагрузки по сравнению с материалом, армированным стеклотканью с прямолинейной

ориентацией в двух направлениях (образец с прямолинейным расположением волокон, 10,1 кН).

Список использованной литературы

1. Фацзуллин И.З., Мусин И.Н., С.И. Вольфсон. Особенности производства изделий из дерево-полимерного композита // Вестник Казанского технологического университета. №3. 2015.

2. Ищенко А.В., Огурцова Ю.Н., Строкова В.В. Особенности фибры различного состава как элемента самоочищающейся поверхности // Вестник белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. №11. 2017. С. 18-24.

3. Лисятников М.С., Чибрикин Д.А., Прусов Е.С., Терентьев К.М., Рощина С.И. / Прочностные характеристики полимерных композиционных материалов для строительных конструкций // Известия высших учебных заведений. Строительство №2(794) 2025. С. 139-150.

4. Антибас И.Р. Влияние армирования стекловолокном на механические свойства полиэстерных композитов // Advanced engineering research (rostov-on-don) №4. 2023 С.387-397.

5. Lisyatnikov M.S., Chibrikin D.A., Prusov E.S., Roshchina S.I. Mechanical characteristics of polymer composites based on epoxy resins with silicon carbide // Construction Materials and Products. 2024. Т. 7. № 5. DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-5-3.

УДК 669.2

АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ БРОНЕЙ В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ ВООРУЖЕНИЙ

Крюков Дмитрий Борисович, к.т.н., доцент кафедры «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

Пензенский государственный университет (г. Пенза, ул. Красная, д. 40, 440028, Российская Федерация) ddbbkk@yandex.ru

Аннотация. Статья рассматривает технологии бронирования военной техники с использованием алюминиевых сплавов, которые стали легкой и эффективной альтернативой традиционной стальной броне. Основное внимание уделено ключевым свойствам алюминиевых сплавов, таким как высокая прочность при низком весе, устойчивость к коррозии и жесткость, что делает их идеальными для применения в бронетехнике. Описаны методы испытаний алюминиевой брони, включая тесты на пулестойкость и керосиновую пробу для анализа характера разрушения бронеплит. Приведены примеры успешного использования алюминиевой брони в боевых условиях. Особый акцент сделан на перспективных разработках, таких как композитная броня и пеноалюминий, которые открывают новые возможности для повышения уровня защиты и мобильности бронетехники. Также подчеркивается актуальность применения инновационных композиционных материалов на основе высокопрочных алюминиевых сплавов с интерметаллическим упрочнением. Статья делает вывод, что алюминиевая броня продолжает развиваться, оставаясь важным компонентом как военных, так и гражданских технологий, и сохраняет свою значимость в современных условиях.

Ключевые слова: алюминиевые броневые сплавы, композитная броня, пеноалюминий, шкала поражения броневых преград, композиционный материал

ASPECTS OF ALUMINUM ARMOR USE IN MODERN WEAPONS SYSTEMS

Kryukov Dmitry Borisovich, Ph.D., Associate Professor of the Department of Welding, Foundry and Materials Science

Penza State University (Penza, Krasnaya str., 40, 440028, Russian Federation) ddbbkk@yandex.ru

Abstract. The article examines military vehicle armoring technologies using aluminum alloys, which have become a lightweight and effective alternative to

traditional steel armor. The main focus is on the key properties of aluminum alloys, such as high strength at low weight, corrosion resistance and rigidity, which makes them ideal for use in armored vehicles. Test methods for aluminum armor are described, including bullet resistance tests and a kerosene test for analyzing the nature of armor plate destruction. Examples of the successful use of aluminum armor in combat conditions are given.
Particular emphasis is placed on promising developments such as composite armor and foam aluminum, which open up new opportunities for increasing the level of protection and mobility of armored vehicles. The relevance of using innovative composite materials based on high-strength aluminum alloys with intermetallic hardening is also emphasized. The article concludes that aluminum armor continues to evolve, remaining an important component of both military and civilian technologies, and retains its importance in modern conditions.
Keywords: aluminum armor alloys, composite armor, foam aluminum, armor barrier damage scale, composite material

Введение

Современные технологии бронирования вышли далеко за пределы использования традиционных материалов. Алюминиевые сплавы, вопреки кажущейся мягкости чистого алюминия, стали ключевым элементом для создания легкой, прочной и высокоэффективной брони. Такая броня активно применяется в бронетехнике по всему миру, демонстрируя свои преимущества в условиях реальных боевых задач. Среди наиболее известных примеров массового использования алюминиевой брони можно выделить:

1) Американский бронетранспортер M113, который стал одним из первых массовых образцов бронетехники с алюминиевой броней. Его корпус изготовлен из алюминиевого сплава 5083, легированного магнием. Более 80 тысяч таких машин были произведены, и многие из них до сих пор остаются в строю [1]. M113 доказал свою эффективность во время Вьетнамской войны, где его легкая броня обеспечивала защиту от стрелкового оружия и осколков.

2) Советская БМП-1, принятая на вооружение в 1966 году, стала первой советской боевой машиной пехоты с алюминиевой броней. Надмоторная часть её корпуса была защищена броневым алюминиевым сплавом 1901, который выдерживал попадания бронебойных пуль калибром до 23 мм [2].

3) Российские БМД-1 и БМП-3. Так, в частности, БМД-1, созданная на основе броневого алюминиевого сплава 1901, в 1976 году стала первой в мире машиной, десантированной с экипажем. Её алюминиевый корпус обеспечил не только защиту, но и высокую прочность конструкции. БМП-3, созданная на основе броневого алюминиевого сплава 1903, стала полностью алюминиевой боевой машиной, включая башню. Использование алюминия снизило её вес почти на треть по сравнению со стальной броней [3].

Материалы

Эти разработки подтверждают, что алюминиевые сплавы являются востребованным материалом в современных системах защиты вооружений военной и специальной техники, сочетая в себе легкость, надежность и технологичность, а их применение весьма актуально.

Алюминий в чистом виде – мягкий и легкий металл, но его сплавы с добавлением магния, цинка, меди и других элементов обладают уникальными свойствами. Основные характеристики, которые делают алюминиевые сплавы идеальными для бронирования это:

Во-первых, это высокая прочность при малом весе. Современные алюминиевые сплавы могут быть в 15–20 раз прочнее чистого алюминия. Например, сплав 5083, используемый в американских бронетранспортерах M113, обладает пределом прочности до 300 МПа. Хотя сталь все еще тверже (предел прочности высокопрочных сталей достигает 1000 МПа), алюминиевая броня при той же массе оказывается толще, что компенсирует разницу в твердости [4].

Во-вторых, это легкость. Плотность алюминия составляет около 2,7 г/см³, что почти в три раза меньше, чем у стали (7,8 г/см³). Это позволяет значительно снизить массу бронетехники, что критически важно для повышения ее тактико-технических характеристик, мобильности, проходимости и возможности десантирования.

В-третьих, это коррозионная стойкость. Алюминий естественным образом образует на своей поверхности оксидную пленку, которая защищает его от коррозии. В отличие от стали, алюминиевая броня не требует дополнительной защиты от ржавчины, что снижает затраты на обслуживание [5].

В-четвертых, это жесткость и конструктивная применимость. Алюминиевые сплавы обладают высокой жесткостью, что позволяет использовать их в качестве несущих элементов конструкции. Например, корпус БМД-1, выполненный из сплава броневого алюминиевого сплава 1901, не только защищает экипаж, но и выдерживает значительные механические нагрузки.

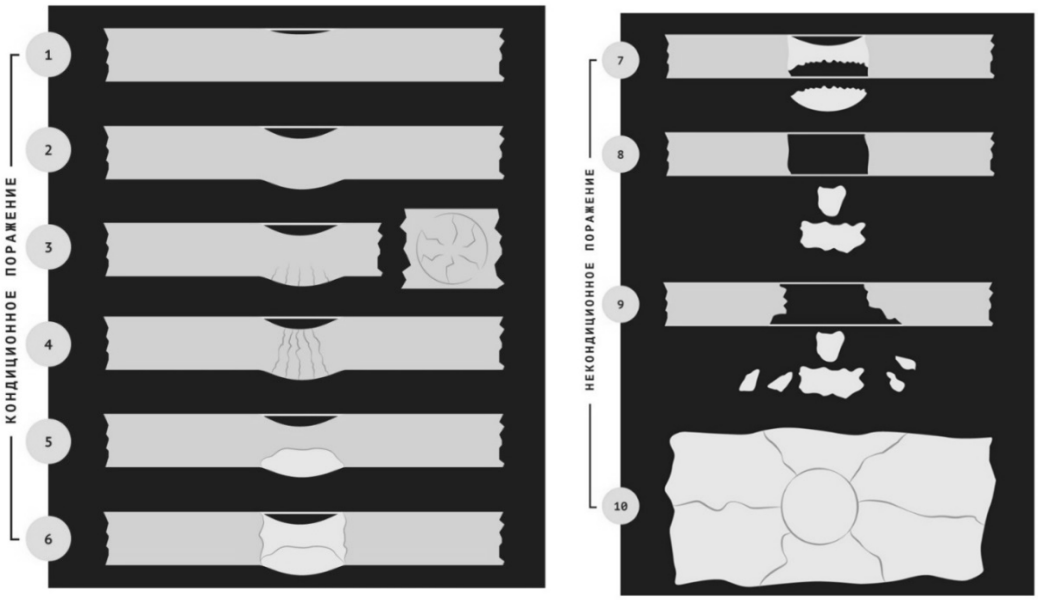
Результаты и обсуждение

В Российском центре испытаний (РЦИ) при московском «НИИ стали» ежедневно проводятся десятки тестов с тем, чтобы оценить защитные свойства новых броневых алюминиевых сплавов [6]. Испытания включают в себя:

а) Обстрел из стрелкового оружия и легких пушек калибром до 23 мм., при этом броневые алюминиевые панели устанавливают под разными углами. После каждого выстрела специалисты оценивают степень поражения брони по 10-балльной шкале (см. рис. 1 и табл. 1) [7];

б) Оценку характера разрушения броневой панели с использованием метода «керосиновой пробы». Этот простой, но эффективный метод позволяет

быстро оценить целостность бронеплиты. Если керосин, нанесенный с одной стороны бронепанели, после отстрела, просачивается на обратную сторону, это свидетельствует о наличии в ней сквозных микротрещин.



а) б)

Рис. 1. Стандартная шкала поражения броневых преград из сплавов алюминия

Таблица 1. Характеристики поражения броневых алюминиевых преград

Характер поражения броневых преград	Балл	Описание поражения
Кондиционное поражение (см. рис.1 а))	1	С тыльной стороны выпучины нет
	2	С тыльной стороны чистая выпучина любой величины
	3	С тыльной стороны чистая выпучина любой величины с мелкими надрывами
	4	С тыльной стороны чистая выпучина любой величины с радиальными сквозными надрывами и трещинами. Керосин просачивается
	5	С тыльной стороны наметилась пробочка без пробития
	6	С тыльной стороны чистая выпучина любой величины по окружности, наметившийся откол
Некондиционное поражение (см. рис.1 б))	7	Откол любой формы и величины с тыльной стороны при непробитии листа
	8	Сквозная пробоина с чистыми или рваными краями с тыльной стороны или выбитая пробочка, или выход сердечника
	9	Сквозная пробоина с отколом любой формы и глубины с тыльной стороны или сквозная пробоина с одним или несколькими кольцевыми расслоениями
	10	Раскол карты или сквозные трещины, выходящие за пределы поражения в результате испытаний

Высокая прочность и твердость броневых алюминиевых сплавов 1901 и 1903 достигаются за счет увеличения содержания в них цинка и магния. Российские разработчики придерживаются суммарного содержания этих элементов в пределах 7-9%, что обеспечивает дополнительную прочность по сравнению с зарубежными аналогами, где этот показатель составляет 5-7%.

Однако увеличение содержания цинка и магния повышает склонность данных сплавов к коррозии под напряжением [8]. Для компенсации этого недостатка используются модифицирующие добавки, такие как хром и цирконий, а также уникальные режимы термической обработки.

Зарубежные сплавы, напротив, ориентированы на повышенную коррозионную стойкость, но при этом имеют умеренную прочность [9, 10]. Российские сплавы демонстрируют высокую живучесть, то есть способность сохранять защитные свойства при многократном воздействии, что критически важно для бронированной техники.

Для достижения необходимых свойств, броневые алюминиевые сплавы 1901 и 1903 проходят термическую обработку при температуре от 450 до 500 °C, после чего подвергаются искусственному старению. Это обеспечивает им высокую прочность и устойчивость к деформациям. Кроме того, в состав сплавов вводят дополнительные легирующие элементы, такие как марганец, медь, титан, хром, цирконий и даже серебро, каждый из которых выполняет свою функцию. Например, медь повышает прочность, но снижает свариваемость, а хром и цирконий увеличивают коррозионную стойкость под напряжением. Эти добавки, наряду с уникальными технологиями обработки, делают российские сплавы лучшими в мире по сочетанию прочности, живучести и коррозионной стойкости.

Таким образом, российские алюминиевые броневые сплавы системы Al-Zn-Mg, представляют собой актуальное решение для броневой защиты военной техники. Их уникальные свойства и оптимизированные технологии обработки позволяют создавать легкие, прочные и долговечные конструкции, что подтверждается успешным применением в бронетехнике, включая десантные машины.

Сегодня исследования в области разработки броневых алюминиевых сплавов продолжаются. Ученые работают над созданием новых материалов с повышенной коррозионной стойкостью, а также разрабатывают композитные алюминиевые брони.

Композитная броня представляет собой многослойный композиционный материал, где алюминиевые сплавы сочетаются с керамикой и полимерными материалами. Это позволяет повысить защиту техники от бронебойных пуль и кумулятивных снарядов.

Одной из перспективных разработок «НИИ стали» в области легкого бронирования, на сегодняшний день, является пеноалюминий [11]. В основе технологии его получения лежит метод порошковой металлургии. Пористая алюминиевая матрица пеноалюминия состоит из высокопрочного алюминиевого сплава и нитрида титана (TiN_2). Пеноалюминий обладает

высокой энергопоглощающей способностью и идеально подходит для защиты техники от мин и фугасов, что делает его перспективным материалом для использования в бронетехнике, предназначенной для действий в условиях городских боев. Использование пеноалюминия при изготовлении днища перспективной российской боевой машины пехоты нового поколения «Курганец-25» позволило снизить её вес на 300 килограммов, существенно улучшив ее тактико-технические показатели.

Благодаря оптимизации состава и технологий обработки, российские броневые алюминиевые сплавы превосходят зарубежные аналоги, обеспечивая высокий уровень защиты при минимальной массе конструкции. Так, современные российские боевые машины БМД-4М и БТР-МДМ «Ракушка» относящиеся к технике воздушно-десантных войск (ВДВ) также являются ярким примером использования передовых композиционных броневых алюминиевых сплавов. БТР-МДМ «Ракушка» - российский десантируемый бронетранспортёр, созданный на волгоградском тракторном заводе, предназначен для перевозки личного состава, боеприпасов, запасных частей, ГСМ в подразделениях ВДВ и морской пехоты. По ходовой части и силовой установке данная машина унифицирована с БМД-4М. БМД-4М «Садовница» - модернизированная боевая машина десанта четвёртого поколения с новым корпусом, двигателем, ходовой частью и другими узлами. Корпуса БМД-4М и БТР-МДМ изготовлены с применением сверхпрочного алюминиевого сплава ПАС-1 нового поколения, разработки «НИИ стали», что обеспечивает надежную противопульную защиту и предотвращает поражение осколками экипажа внутри машины.

В Пензенском государственном университете, на кафедре «Сварочное, литейное производство и материаловедение» разработан новый композиционный броневой материал на основе высокопрочного алюминиевого сплава В95 с интерметаллическим упрочнением [12]. В основу броневого материала положено армирование его структуры перфорированными слоями титанового сплава ВТ1-0. Специальный режим термической обработки композита позволил сформировать на границах армирующих слоев и основы алюминиевой матрицы композита высокотвердые интерметаллические слои на основе алюминида титана ($TiAl_3$) заданной толщины, способствующие разрушению баллистического объекта. Наличие перфораций в промежуточных титановых слоях между основными слоями алюминиевой матрицы композита позволило локализовать механизм развития хрупких трещин при баллистическом воздействии на материал, тем самым повысив живучесть самой алюминиевой брони. Композиционный материал изготавливается методом сварки взрывом, имеющим существенные преимущества, по сравнению с традиционными технологиями получения многослойных металлических материалов [13-16].

Выводы

Алюминиевая броня находит применение не только в военной, но и в гражданской сфере. Из неё изготавливают бронежилеты, шлемы для полицейских, автомобили для инкассаторов и даже защитные конструкции для банковских хранилищ.

Таким образом, проведенный аналитический обзор, позволяет сделать вывод о том, что алюминиевая броня представляет собой не просто легкую замену стали, а высокотехнологичный материал, который постоянно развивается и совершенствуется. Благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая прочность при малом весе, устойчивость к коррозии и жесткость, алюминиевые сплавы стали неотъемлемой частью современной бронетехники. Они обеспечивают надежную защиту, повышают мобильность и маневренность боевых машин, что особенно важно в условиях современного поля боя. Многочисленные испытания и реальное боевое применение подтвердили, что алюминиевая броня способна выдерживать значительные нагрузки, сохраняя при этом легкость конструкции.

Разработчики продолжают активно работать над улучшением характеристик брони, стремясь сделать её еще прочнее, легче и надежнее. В испытательных центрах проводятся тесты, а в лабораториях создаются новые сплавы и композитные материалы, которые открывают дополнительные возможности для повышения уровня защиты. Алюминий, который когда-то считался слишком мягким для военных нужд, сегодня стал символом инноваций в области бронезащиты, демонстрируя, что современные технологии способны превратить даже "неподходящие" материалы в ключевые элементы оборонных технологий.

Список использованной литературы

1. Технические характеристики бронетранспортера M113 / Министерство обороны США. – URL: https://www.army.mil/m113 (дата обращения: 22.11.2024).

2. Скляров В.А., Гребенников С.Ф. Бронетанковая техника: история, конструкция, применение. – М.: Воениздат, 2005. – 320 с.

3. Федосеев С.В. Боевые машины пехоты и бронетранспортеры. – М.: Экспринт, 2003. – 256 с.

4. Гуляев А.П. Металловедение: учебник для вузов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

5. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1981. – 416 с.

6. Российский центр испытаний (РЦИ): официальный сайт. – URL: https://www.rci-steel.ru (дата обращения: 16.12.2024).

7. Фишман Р. Секрет алюминиевой брони: самой легкой защиты для военной бронетехники: сайт. URL: https://techinsider.ru (дата обращения: 15.12.2024).

8. Коррозионная стойкость алюминиевых сплавов / Журнал «Металлы и сплавы». – 2021. – № 4. – С. 12–18.

9. Jane’s Armour and Artillery. – 2020 Edition. – Jane’s Information Group, 2020. – 720 p.

10. Hutchinson B., Ringer S.P. Aluminium Alloys for Armour Applications // Materials Science and Engineering: A. – 2000. – Vol. 280, № 1. – P. 75–83.

11. Современные алюминиевые сплавы для бронирования / НИИ стали. – М.: НИИ стали, 2022. – 45 с.

12. Крюков Д.Б. Аспекты получения легких броневых композиционных материалов с механизмом локализации хрупких трещин в структуре при баллистическом воздействии // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии». 2023. № 1 (25). С. 20–28.

13. Крюков Д.Б. Структурные особенности и технология получения легких броневых композиционных материалов с механизмом локализации хрупких трещин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 103–111.

14. Крюков Д.Б. Перспективные легкие трещиностойкие брони, полученные с применением технологии сварки взрывом / Д.Б. Крюков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2022. – Т. 18. – № 10 (214). – С. 440-443.

15. Первухин Л.Б., Крюков Д.Б., Кривенков А.О., Чугунов С.Н. Получение высокопрочных композиционных броневых материалов сваркой взрывом на основе новых схем армирования // Научно-методический журнал "Наука, техника и образование" № 8 (61) – Москва: Изд-во "Проблемы науки", 2019 – С. 11-15.

16. Первухин Л.Б., Крюков Д.Б., Кривенков А.О., Чугунов С.Н. Высокопрочные армированные композиционные броневые материалы, полученные сваркой взрывом // Научный альманах № 9-1 (59), Тамбов: Изд-во ООО «Консалтинговая компания Юком», 2019 – С. 147-153.

УДК 691.3

АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ БЕТОНОВ С ДОБАВЛЕНИЕМ БАКТЕРИЙ СПОСОБСТВУЮЩИХ САМОЗАКАЛИВАНИЮ ТРЕЩИН

Крюкова Евгения Александровна*, студент ИАСЭ, **Рева Дмитрий Вадимович**, ассистент кафедры строительных конструкций ИАСЭ, **Васильева Анастасия Анатольевна**, студент ИАСЭ

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), krukova2111@mail.ru

Аннотация. Для получения биобетона используют щелочно-резистентных спорообразующих бактерий. Их особенность в образовании спор, которые поначалу являются спящими, однако способны выдержать механические и химические воздействия. При этом споры остаются жизнеспособными.
Ключевые слова: бетон, биобетон, трещины, самовосстанавливающегося бетона.

ANALYSIS AND COMPARISON OF CONCRETE WITH THE ADDITION OF BACTERIA PROMOTING SELF-HARDENING OF CRACKS

Kryukova Evgeniya Alexandrovna *, student of IABE**, Reva Dmitry Vadimovich,** Assistant of the Department of Building Structures of IABE**, Vasilyeva Anastasia Anatolyevna,** student of IABE

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), krukova2111@mail.ru

Abstract. Alkali-resistant spore-forming bacteria are used to produce biobetone. Their peculiarity is the formation of spores, which are dormant at first, but are able to withstand mechanical and chemical influences. At the same time, the disputes remain viable.
Keywords: concrete, biobetone, cracks, self-healing concrete.

Введение

На сегодняшний день бетон является самом распространенном и основным искусственным материалом, который применяется в строительстве, который способен выдерживать значительные нагрузки. Основной проблемой и по сей день остается появление трещин. Чтобы решить эту проблему применяют с самовосстанавливающихся материалы (биобетон). Подобные материалы способны конкурировать по показателям прочности конструкция и предотвращение коррозии арматуре с обычным бетоном.

Актуальность бактерий биобетона обусловлена рядом факторов таких как самовосстановление, укрепление почвы, экологичность.

Самовосстановление — это известный процесс, которая заключается в том, что трещины в бетоне способны затягиваться самостоятельно, благодаря гидратация минералов или карбонизации гидроксида кальция. Однако этот процесс требует определённого количества воды и размерами трещины.

Чтобы получить биобетон, применяются конкретные микроорганизмы (бактерии).

Bacillus cohnii

Одна из биодобавок была разработана учеными Политехнического института Дальневосточного федерального университета. В добавке содержится водный концентрат. Бактерии Bacillus cohnii заполняют появляющиеся трещины и повреждения карбонатом кальция.

Были проведены эксперименты, в ходе которых выяснилось, что после того, как бетон получает трещину, микроорганизмы получает доступ к кислороду и воде. Такие бактерии способны заживлять трещину шириной до 0,6 мм в течение 28 дней. После ликвидации трещины бактерии снова засыпают [7].

Споры бактерий Bacillus cohnii способны жить больше 100 лет, соответственно, способны обеспечить такой же срок службы для здания и сооружений, что значительно больше, чем это смог бы сделать обычный бетон [5]. Это влечет за собой уменьшение затрат на ремонт [3].

Некоторые ученые полагают, что подобный бетон может быть невероятно полезным в районах с сейсмической опасностью, ведь в таких местах может появляться много опасных трещин или микротрещин.

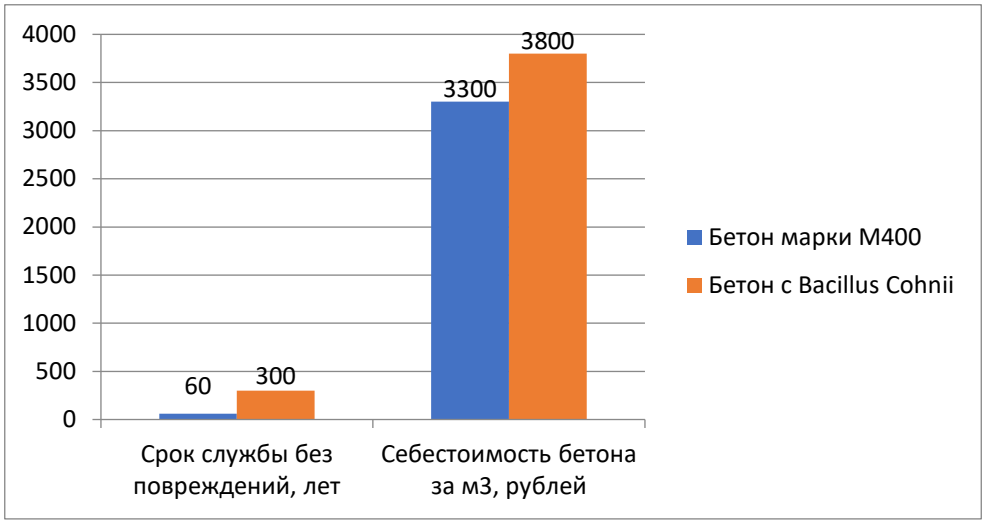


Рис. 1. Сравнение показателей качества обычного бетона марки М400 и бетона с Bacillus Cohnii [6]

Bacillus megaterium

Биоактивные микроорганизмы могут привести к герметизации микротрещин, при этом отбираются египетские бактерии, как Bacillus megaterium (Bm).

В одном из примеров Bacillus megaterium добавляли в растворную смесь в концентрации 0,5% от массы цемента, затем в течение 180 дней проверяли механические и физические свойства. Прочность на сжатие образцов бактериального раствора Bm0.5 увеличилась на 21,4% через 28 дней по сравнению с контрольным. Скорость водопоглощения образцов Bm снизилась на 12,4% через 180 дней [4]. Образцы бактериальных растворов показали значительное восстановление прочности при сжатии по сравнению с исходными образцами на 21% Bm 0.5.

Образцы слоистых армированных материалов для бактериальных растворов показали пластичность и меньшую деформацию при воздействии нагрузки по сравнению с контролем. В одной из работ был разработан новый бетон с улучшенными механическими и физическими свойствами с использованием отборных египетских микроорганизмов, он может способствовать самовосстановлению микротрещин с повышением долговечности бетона. Применение самовосстанавливающегося биобетона может снизить затраты на проверку и техническое обслуживание [4].

Bacillus subtilis

Bacillus subtilis используют для производства самовосстанавливающегося бетона. Его производство ничем не отличается от производства обычного бетона, единственное отличие в наличии определенных добавок.

Как и в предыдущих случаях, бактерии находятся в состоянии сна и начинают активную деятельность только после контакта с водой и кислородом, в результате образования повреждений в бетонной массе [5].

Основные преимущества и проблемы применения Bacillus subtilis: пластичность; малая деформативность; снижение затрат на проверку и техническое обслуживание; ликвидация трещин в бетоне.

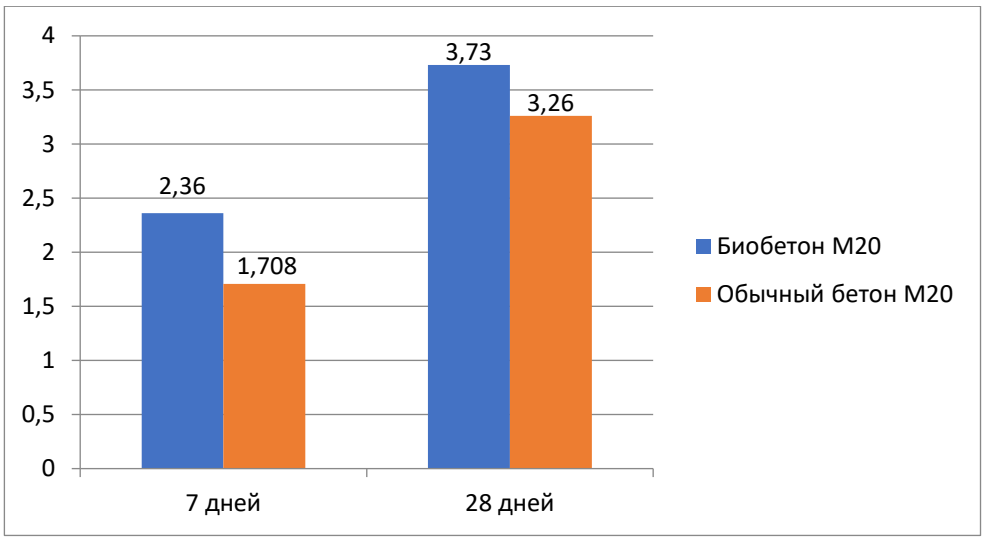


Рис. 2. Сравнение прочности на растяжение био- и обычного бетона М20, МПа [5]

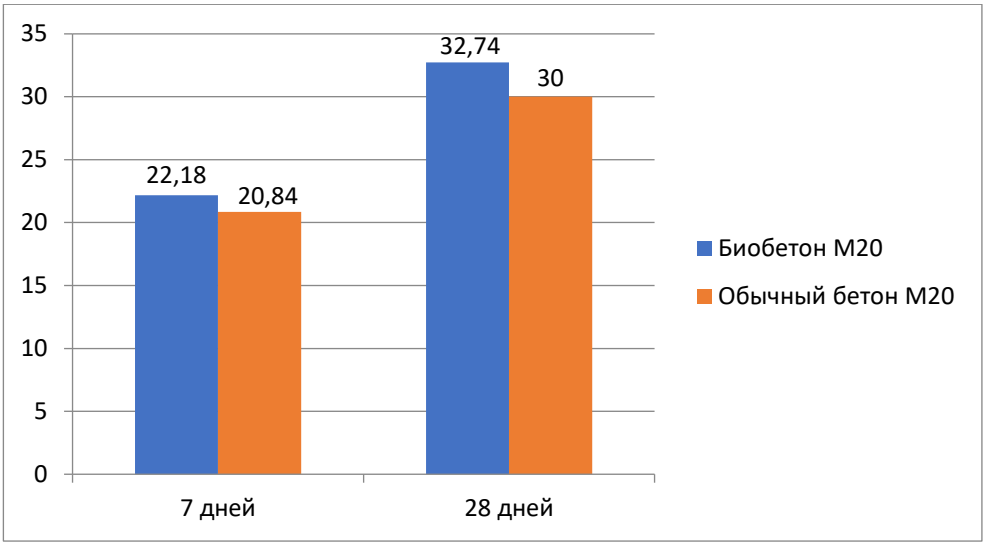


Рис. 3. Сравнение прочности на сжатие био- и обычного бетона М20, МПа [5]

Bacillus sphaericus

Бактерии Bacillus sphaericus питаются пропионатом кальция, в результате чего преобразовывают его в карбонат кальция.

Бактериальный бетон превосходят обычные бетоны по механической прочности, то же самое можно сказать про прочность на сжатие и растяжение. Исследования показывают, что бактерии, которые содержат в себе от 10^6 до 10^8 колониеобразующих единиц на миллилитр бактерий Bacillus sphaericus, дают наилучшие результаты.

Вода всегда была неотъемлемым компонентом бетонной смеси. Ее смешивают с микроорганизмами стерильных культур, не забывая про питательные вещества. После формирования блоков и выдерживания их в воде определенное количество времени, проводится тестирование на растяжение и сжатие [5].

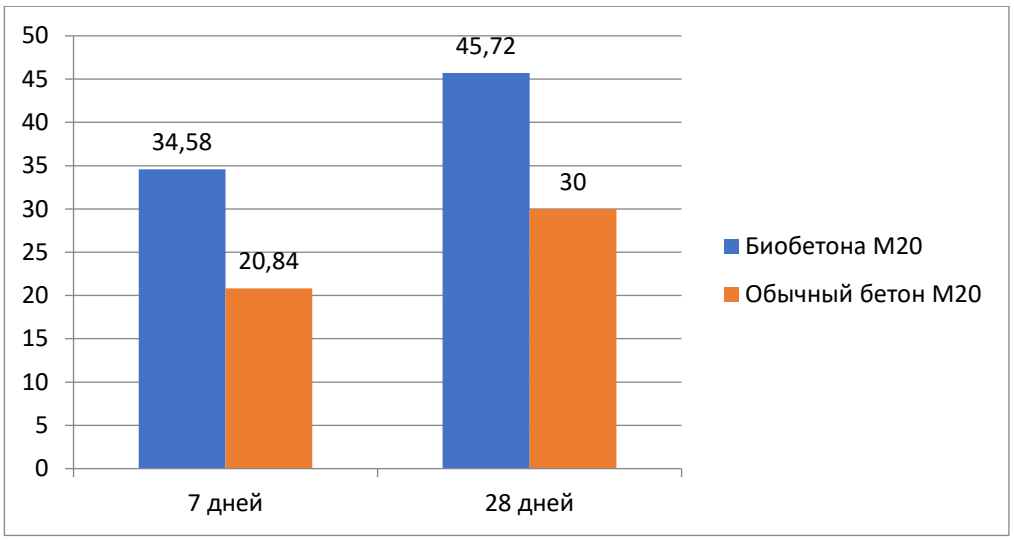


Рис. 4. Сравнение прочности на сжатие био- и обычного бетона, МПа [5]

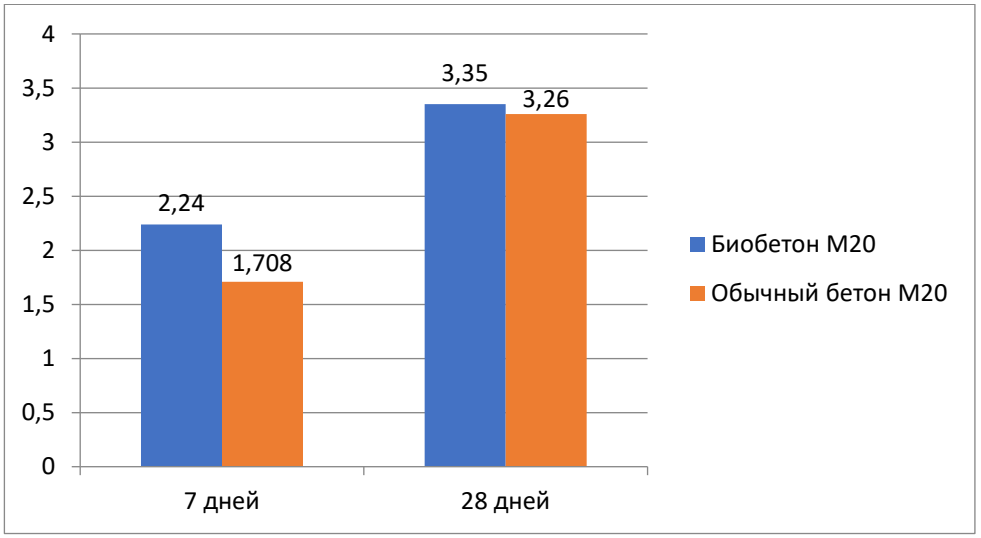


Рис.5. Сравнение прочности на растяжение био- и обычного бетона, МПа [5]

Bacillus pasteurii

Стоит выделить особенность бактерий Bacillus pasteurii повышать щелочность воды, активно растворяющей соли угольной кислоты, кальций и карбонаты. Получившиеся кристаллы можно назвать цементом, которые будут связываться песчаником и бетоном, вместе все это будет заполнять мелкие трещины [1].

Роль связующего компонента играет фосфат магния, исходя из предположения, что он способствует благоприятной среде для лишайников, мхов и грибов. Это поможет ликвидировать трещину в конструкции без помощи человека.

В этом случае будут три бетонных слоя. Первый для защиты от влаги, второй — для удержания воды, третий – для гарантии защиты от перегрева или переохлаждение.

Помимо ликвидаций трещин в бетоне применение Bacillus pasteurii позволяет сокращать расходы на отопление в холодный период года и кондиционирование в теплый период.

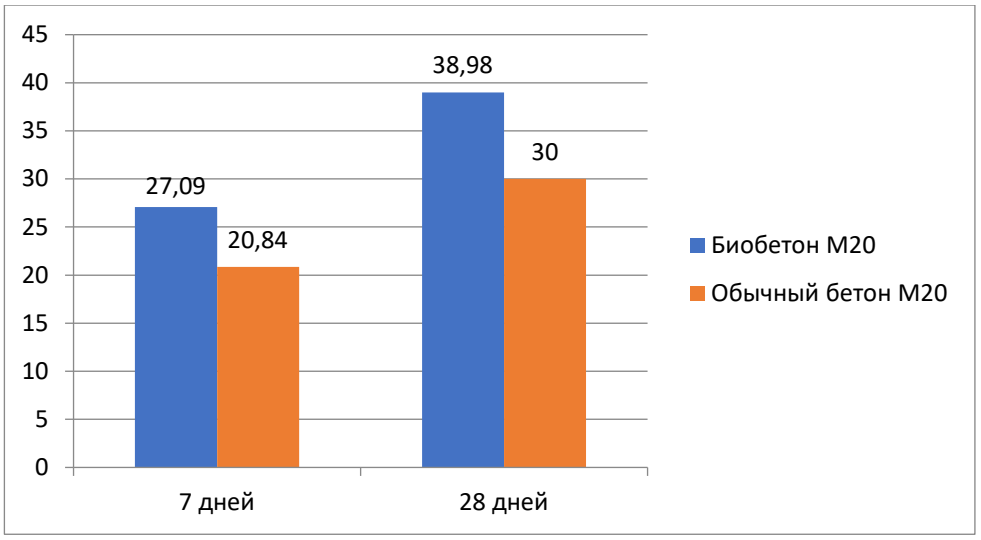


Рис. 6. Сравнение прочности на сжатие био- и обычного бетона, МПа [5]

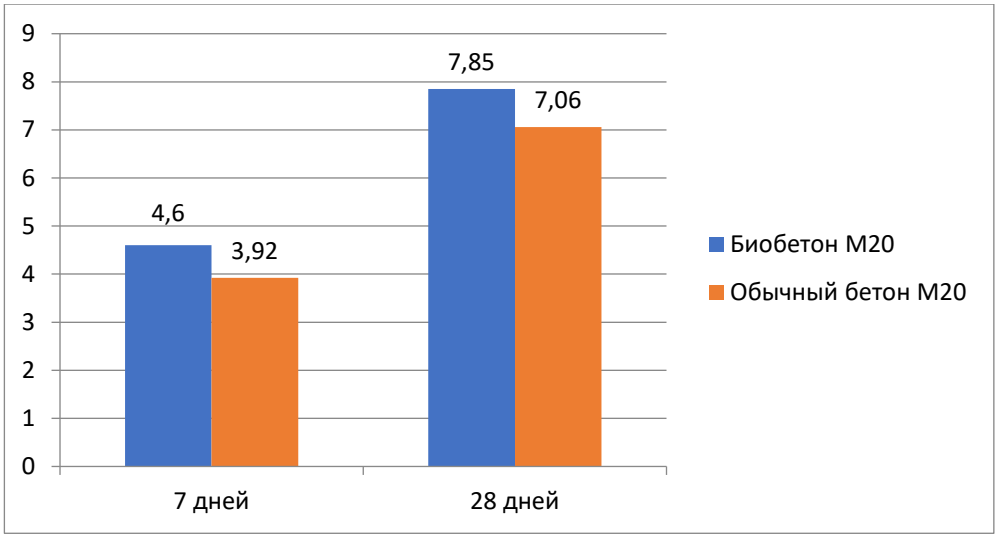


Рис. 7. Сравнение прочности на изгиб био- и обычного бетона, МПа [5]

Палочковидные бактерии

Для решения одной из проблем – сухости – используются палочковидные бактерии из-за их выносливости и долговечности. Чтобы защитить бактерии и питать их, они помещены в маленькие капсулы из биоразлагаемого пластика, которые растворяются при попадании влаги. Поэтому, когда возникает трещина, влага, попадающая внутрь, вызывает химическую реакцию, результатом которой является образование известняка, заполняющего трещину [2].

Из достоинств палочковидных бактерий можно выделить: высокая устойчивость к климатическим условиям; защита окружающей среды бетона; отсутствие трещин и длительный срок службы бетона; практичность.

Вывод

Среди представленных биодобавок биобетона можно выделить Bacillus subtilis, Bacillus pasteurii, Bacillus sphaericus. Самые высокие показатели прочности на сжатие у бетона с Bacillus sphaericus, если сравнивать с обычным бетоном (см. рис. 4), а наиболее высокий показатель прочности на растяжение имеет бетон с Bacillus subtilis (см. рис. 2). Бетон с Bacillus pasteurii уступает по прочности на сжатие, но обладает высоким показателем прочности на изгиб (см. рис. 7). Если возникает проблема сухости, а также для защиты бактерий и их питания, то используются палочковидные бактерии.

На данный момент, биобетон находится на стадии разработки и одно из видимых его недостатков – большие затраты.

Биобетон по сравнению с обычным бетоном обеспечивает заживление трещин и, следовательно, увеличивает сроки эксплуатации здания и сооружений (см. рис. 1). Это одно из самых главных достоинств биобетона.

Список использованной литературы

1. Новые разновидности бетона / А. И. Машукова, С. Ф. Матвеев. 2015. С. 485-488.
2. Цемент, вода, агрегаты и биологические добавки, присутствующие в биобетоне / А. В. Фулина. 2023. С. 49-53.
3. Технология производства самовосстанавливающегося бетона специального назначения / К. А. Корнаушенко. 2023. С. 181-183.
4. Production of bioconcrete with improved durability properties using Alkaliphilic Egyptian bacteria / Ш. О. Ахмед, А. А. Наccер, Р. Н. Аббас. 2021. Т. 11, № 5. С. 1-15.
5. Bioconcrete: next generation of self-healing concrete / М. Сейфан, А.К. НuСамани, А. Береджян. 2016. Т. 100, № 6. С. 2591-2602.
6. An Experimental Study on Self-remediating Bacterial Concrete / 2020. С. 283–293, С. Гириш, Т. Соумья.
7. Бактерии для получения биобетонов / В. Т. Ерофеев, С. Д. С. Аль Дулайми, В. Ф. Смирнов, В. Т. Фомичев. 2018. С. 26-29.

УДК 004.92

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА RENGA

Кузнецова Ольга Геннадьевна, ст. преп. каф. «Инженерная геометрия и основы САПР» (ИГС), **Решетников Михаил Константинович**, д.т.н., профессор, зав. каф. «Инженерная геометрия и основы САПР» (ИГС)

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (г. Саратов, ул. Политехническая, 77, 410054, Российская Федерация), graphic@sstu.ru,

Аннотация. В статье определена цель учебного процесса подготовки специалистов архитектурно-строительной сферы. Сформулированы задачи обучение с применением технологии информационного моделирования (ТИМ). Описаны применяемые педагогические методы с целевыми установками их значимости для конкретных этапов процесса освоения программного комплекса Renga. Сформулирована общая структура обучения студентов для направлений «Архитектура», «Дизайн архитектурной среды», «Промышленное и гражданское строительство» и «Транспортное строительство». Представлен разработанный комплекс учебных заданий и упражнений по цифровому информационному моделированию в программе Renga. Выделены и охарактеризованы качественные характеристики практических навыков и определены пути развития умений студентов, получаемые в ходе образовательного процесса. В заключении подведено обобщение, описаны используемые способы и приемы в соответствии с программной спецификой российского ТИМ-продукта.
Ключевые слова: технология информационного моделирования (ТИМ); цифровая информационная модель (ЦИМ); программный комплекс Renga; обучение с применением ТИМ, создание проектной документации здания и сооружения.

EXPERIENCE OF USING THE RENGA SOFTWARE PACKAGE

Kuznetsova Olga Gennadievna, senior lecturer of department «Engineering Geometry & CAD Systems», **Reshetnikov Mikhail Konstantinovich**, Grand PhD in Engineering, Prof., Head of the Department «EGS»

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (Saratov, 77 Politechnicheskaya St., 410054, Russian Federation), graphic@sstu.ru,

Abstract. The article defines the purpose of the educational process of training specialists in the architectural and construction industry. The tasks of training using building information modeling (BIM) are formulated. The applied pedagogical

methods are described with the target settings of their importance for specific stages of the process of mastering the Renga software package. The general structure of students' education is formulated for the areas of «Architecture», «Design of the architectural environment», «Industrial and civil engineering» and «Transport construction». The developed set of training tasks and exercises on digital information modeling in the Renga program is presented. The qualitative characteristics of practical skills are highlighted and characterized, and the ways of developing students' skills acquired during the educational process are identified. In conclusion, a generalization is summarized, the methods and techniques used are described in accordance with the programmatic specifics of the Russian BIM-product.
Keywords: Building Information Modeling (BIM), Digital Information Model (DIM), The Renga complex program, training using BIM, creation of design documentation for buildings and structures.

Введение

Целью обучения специалистов архитектурно-строительной сферы является развитие профессиональных навыков проектирования зданий и объектов инфраструктуры. Высокая квалификация не может быть приобретена без понимания принципов функционирования BIM-технологий и владения азами моделирования в BIM-программах. В современных реалиях (с 1 января 2022 года) формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства становится обязательным для заказчика, застройщика, технического заказчика, эксплуатирующей организации, если на этот объект выделены средства «бюджетов бюджетной системы Российской Федерации» [1, с 7]. Очевидно, что содержание обучения необходимо ориентировать на потребности постоянно развивающейся сферы проектирования и строительства. Устойчивые тенденции, развития которой, определены прогрессированием ведения масштабной цифровизации и внедрения технологи информационного моделирования [2].

При организации процесса обучения с применением технологии информационного моделирования, необходимо определение базовых задач, регламентирующих цель. Которые не должны сводиться к изучению стандартного инструментария выбранного программного обеспечения. Необходимо сформировать у обучающихся навыки понимания общего алгоритма осваиваемого BIM-продукта, связанного с комплексным изучением принципов работы, функций и инструментов моделирования цифровой информационной модели (ЦИМ) [3]. Следовательно, системная организация освоения программного комплекса Renga ставит перед собой задачи: изучения и освоения выданного материала; формирование и применение навыков использования программного алгоритма; самостоятельного моделирование через приобретенный арсенал средств. [4]

Таким образом, главной задачей изучения программного комплекса является формирование практических навыков по созданию параметрических

или частично параметрических и непараметрических элементов ЦИМ с атрибутивными и геометрическими данными.

Применяемые методы обучения

Изучение программного комплекса Renga связано с использованием совокупностей педагогических операций практического и теоретического освоения предлагаемого материала. Перечислим методы с целевой установкой их значимости для конкретных этапов освоения программы.

Базовыми, связанными со всеми этапами курса является применение субъектных методов для преподавателя – информационно-сообщающий, объяснительный, инструктивно-практический; а для обучающегося – исполнительный и репродуктивный. Весь теоретический материал структурирован, в процессе изложения ставятся конкретные цели и задачи, которые реализуются в практических демонстрационных примерах.

Каждый новый этап изучения связывается с системой последовательных, взаимосвязанных действий преподавателя и студента, обеспечивая эффективное усвоение содержания образовательного процесса, развитие интеллектуальных способностей, овладение средствами самообразования и самообучения. Первый этап «Базовая ступень» связан с приобретение знаний и формирование умений и навыков. Второй этап «Основная ступень» ориентирован на применение, углубление и закрепление знаний. Третий этап «Информационная ступень» связан с использованием приобретенных знаний, формирование умений и навыков, и закреплением алгоритмов их применения. Четвертый этап «Концептуальное проектирование» связан с проверкой знаний, умений и навыков. Пятый этап «Представления проектной документации» рассчитан на углубление приобретенных знаний, формирование навыков и творческую деятельность обучающихся. Шестой этап «Элемент каталога» связан с творческой деятельностью, закреплением, проверкой знаний, умений и навыков. Таким образом, назначение приемов определяет дидактические цели их применения. Первый и второй этапы используют познавательные и систематизирующие методы; третий, четвертый, пятый и шестой этапы – преобразующие и контрольные методы.

При реализации курса активно применяются перцептивные методы (Методы передачи и восприятия учебной информации посредством чувств по Ю.К. Бабанскому): словесные – лекции, наглядные – демонстрационные презентации на аудиторных занятиях, аудиовизуальные – видео презентации на аудиторных и неаудиторных занятиях, практические – упражнения и задания.

Методами контроля усвоения материала по курсу предлагается теоретическое и практическое тестирование в рамках аудиторной работы. В качестве самоконтроля выступают образцы по заданиям – композиционные сборки графических листов в формате pdf. Которые, как «эталоны-представления» используются студентами для формирования выходных

данных. Данные материалы размешены в «Информационно-образовательная среда» (ИОС) и системе управления образовательными электронными курсами «Moodle» СГТУ имени Гагарина Ю.А. Соответствие заданным требованиям и корректность создания моделей с их информационным насыщением по заданиям курса осуществляется преподавателем при индивидуальном просмотре в формате программы.

Содержание учебного процесса

В процессе освоения программного комплекса используются такие учебные материалы как: «БУКВАРЬ RENGA» [5], «Практическое руководство пользователя Renga» [6], «Renga Архитектура: Базовый уровень» [7], «Renga: Несущие конструкции» [8], а также личные практические наработки и теоретические изыскания.

Обучение ТИМ в Renga – это многоступенчатая миссия. Первая – «Базовая ступень» – связана с решением простых задач построения геометрии здания: ознакомления с инструментами, способами построения объектов и их свойствами, а также изучением основам управления стилями. Вторая – «Основная ступень» – связана с реализацией конструктивных задач: создание и редактирование профиля, построение сборок различных конструкций. Третья – «Информационная ступень», рассматривается в параллели со всеми задачами, ее роль «BIM насыщение» проекта. Даная ступень связана с изучением принципов работы со спецификациями, легендами, таблицами с автозаполнением и стилями свойств объектов. Четвертая ступень – «Концептуальное проектирование» – ставит задачу применения программных средств, для реализации индивидуального проектного замысла. Далее, ступень – «Представления проектной документации», не ранжируется, а разрабатывается и связывается со всеми задачами моделирования, базово рассматривая грамотное формирование визуализации модели, т.е. её наглядного представления. Отдельный блок – «Элемент каталога» связывается с задачей изучение принципов работы с каталогами и библиотеками объектов, а также вопросов их создания [4].

Результаты процесса освоения программного продукта

Результатом освоения программы должен стать реализованный комплекс заданий и упражнений по освоению Renga, с учетом специфики учебных групп. Основной комплект ориентирован, на направления «Архитектура» и «Дизайн архитектурной среды», адаптирован для направлений «Промышленное и гражданское строительство» и «Транспортное строительство» с упором на моделирование конструктивных систем. Каждый компонент учебного комплекса ставит определённые задачи, которые должны быть реализованы, а иначе нельзя говорить об успешном освоении материала. Рассмотрим все задания с примечанием основных моментов, которые вызывают затруднения, поэтапно.

Задание первой ступени «Моделирование типового здания по чертежу» с применением базовых компонентов третьей ступени основано на комплекте вариантов по строительному черчению. В исходных данных содержатся графические проекции и текстовое описание здания. Схемы поэтажных планов представлены с указанием стен и перегородок, с заданной толщиной и материалом. На них приведены размеры в осях между оконными и дверными проемами; показано размещение лестничных клеток и привязка стен здания к их осям. В представленном разрезе даны общее сведенья о конструкции. Также в графической части приведен линейный масштаб для определения размещения перегородок и недостающих размеров частей здания. В таблице даны параметры оконных и дверных проемов, их маркировка указана на план-схемах в графической части. На поэтажных схемах показана нумерация помещений и представлена спецификация в тексте описания. Т.е. дана общая геометрия и информация о здании для создания цифровой информационной модели, которая состоит из таких этапов, как: создание по варианту опорной сетки осей и уровней; работа с инструментарием программы по моделированию геометрии здания; формирование спецификаций и таблиц автозаполнения, использование свойств объектов и применение материалов; оформление графических листов – чертежей с необходимыми проекционными изображениями с аннотациями (размерами), марками, а так же таблиц-спецификаций. При работе над экстерьером и планировкой происходит изучение таких инструментов, как: стены и колонны, перекрытия, кровля, фундамент, лестницы с ограждением, окна и двери, а также формирования навыков использования способов построения, параметров, свойств и стилей. Часть задания, просвещенная информационному наполнению, прежде всего, знакомит обучающихся с общим алгоритмом формирования свойств объектов; спецификаций по экспликации и заполнения оконных и дверных проемов, ведомости графических листов. Реализация ступени «Представления проектной документации» рассматривает общие правила формирование чертежа согласно формам ГОСТ Р 21.101-2020 и сборок всех графических проекций с оформленными аннотационными элементами, создание таблиц «Основная надпись», с применением к ним автозаполнения. Например, представление планов / план-схем / схем зонирования с марками всегда связано с различным уровнем детализации вида, которая настраивается при работе со «Стилями оформления». Работая с образцом представления (Рисунок 1), студенты учатся правильно генерировать полученную в ходе моделирования геометрию здания в стандартную форму представления. Эта задача для проектирования является первостепенной, так как цель любого архитектурно-дизайнерского проектирования – создание проектной документации по объекту. При создании чертежей в программе можно видеть, как меняется внешний вид здания при изменении его частей в «3D виде», и если правильно осуществлены привязки, то изменения, дополнения и корректировки – это не сложная задача для проектировщика.

Упражнение первой ступени «Создание крыш различной геометрии» для всех направлений, ставит своей задачей развития навыка создания требуемой формы кровли. Рассматривается моделирование различных конструктивных типов: односкатного, шатрового, двускатного, вальмового, полувальмового, многощипцогой, ромбовидного, конического, плоского – «разноуклонки», мансардного, комбинированного со слуховыми окнами и фронтонами, а также цилиндрического и сферического сводов на основе использования профиля с применением к «Балке». Общий алгоритм работы предполагает наличие стен на основе, которых ведется построение с привязкой к ним в режиме «Измерения 3D» или построения от ортогональной проекции – «Уровня» для кровли. Алгоритм создания осуществляется инструментом «Крыша», непрерывно, по точкам, предполагая параллельную работу с настройками параметров скат, фронтон, углом наклона и свесом. Процесс построения такой же, как у всех контурных элементов Renga. Такой алгоритм поначалу, вызывает трудности и требует формирования навыка, через многократное повторение и понимание программного алгоритма подрезки стен крышей. У студентов в процессе упражнения и контрольного тестирование по нему формируется умение самостоятельно понимать «поведение будущей геометрии». Так для формирования элементов, которые не должны подрезается, стены не пересекаться крышей, а например, при моделировании печной трубы можно формировать отверстия инструментом «Проем» или использовать «сильный» инструмент «Ленточный фундамент».

Задание второй ступени «Создание модели каркасного дома со стропильной системой» для всех направлений, кроме направления «Транспортное строительство», связано с самостоятельной проектно-конструкторской задачей. Общая геометрия создается по алгоритму задания первой ступени, параметры для объекта задаются самостоятельно, исходя из данных планировки и представления экстерьера в перспективных видах, а главное, конструктивной обусловленности и целесообразности предложенной конструкции деревянного каркаса. При выполнении происходит закрепление и приобретение новых навыков: по созданию сборок; работе в связке инструментов линии модели с балками и колоннами, и применением к ним стилей; создание и представление конструктивных узлов. Информационная составляющая задания связывается с пониманием общего алгоритма просчета материала, и предполагает создание «Ведомость материалов стен».

Задание второй ступени для направления «Транспортное строительство» – «Пространственный каркас» моделирование типового пролета моста осуществляется в работе со сборками. Создаются конструктивные системы опор и пространственных рам металлоконструкций, через использование инструментов: линии модели, балки, колонны и пластины с применённым к ним пользовательским стилем.

Упражнение второй ступени «Ферма», разработанное для всех форм обучения, по созданию сборки по чертежу, с детализацией и оформлением по стандарту: общего вида, фрагментов и разрезов с маркировками элементов и

спецификацией расхода метала. Предполагается использование профилей шаблона проекта, а также их редактированных вариаций; применение «Пластин» связано с формированием навыка работы с углами Эйлера.

Цикл упражнений второй ступени «Работа с профилем» по созданию геометрии профилей заданных габаритов, на основе чертежа и/или рисунка, параметризации и применения в модели созданных элементов. Цикл представлен в вариации архитектурно-дизайнерской и конструкторской тематики. Охарактеризуем данные упражнения. Упражнение «Мулюры» рассматривает вопросы создание геометрии и параметризации криволинейных простых и сложных архитектурных профилей на основе модуля – радиуса заданного размера (Рисунок 2 а)); созданный набор предлагается применить в здании первой ступени, Упражнения для направления «Транспортное строительство» и «Промышленное и гражданское строительство»: «Профили стального проката» с определёнными параметрами длины, высоты, толщины и пр. и «Пластина» – моделирование на основе чертежа (Рисунок 2 б)), с задачей параметризации. Упражнения архитектурно-дизайнерской тематики «Карниз» и «Балясина» ставят задачу использования при моделировании габаритного чертежа и/или растрового изображения, как назначенного материала «подложки» с обрисовкой по нему линиями модели с размерами для подготовки работы со стилем профиля. Базовый алгоритм работы со стилем профиля выполняется в три этапа: вычерчивание опорных линий, обрисовка контура профиля и параметризация согласно логике зависимостей, при которой сохраняется неизменность геометрических пропорций. Этап закрепление цикла упражнений задание «Моделирование лестницы по чертежу» ставит самостоятельную задачу создания и представление сборки на основе лестницы с применением пользовательских профилей к балкам и пластинам.

Задание четвертой ступени для архитекторов и дизайнеров архитектурной среды «Фор-эскиз», ставит задачу создания и представления концептуальной формы здания. Реализуется через построение пространственного каркаса из линий модели и работу с «сильными», «слабыми» элементам с использованием взаимодействия созданных профилей. Задание связано третьей ступенью – информационным наполнением – представлением технико-экономических показателей объекта проектирования: общий и по зонам строительный объем, площадь и периметр здания. Задание ориентировано на изучение возможностей создания наглядных изображений [9, с 71-73], а также освоение и применение средств визуализации объёмных и плоскостных схем функционального зонирования, что является важным для проектировщика.

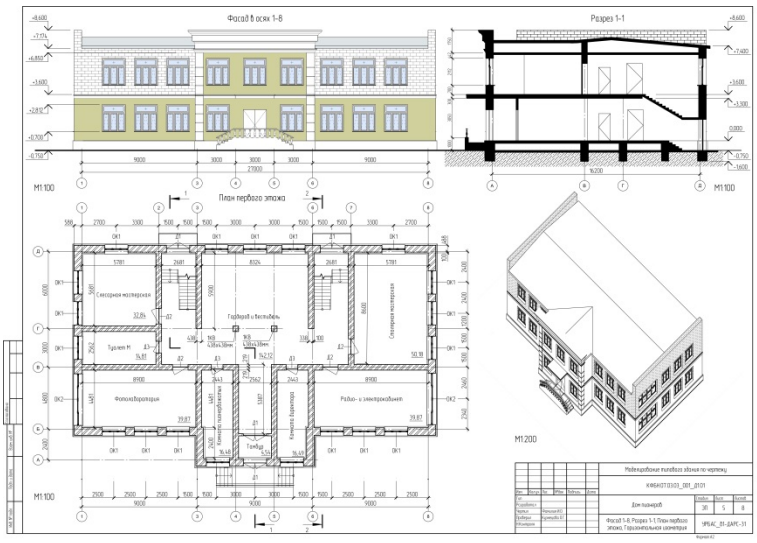


Рис. 1. Оформление листа образца представления по заданию первой ступени

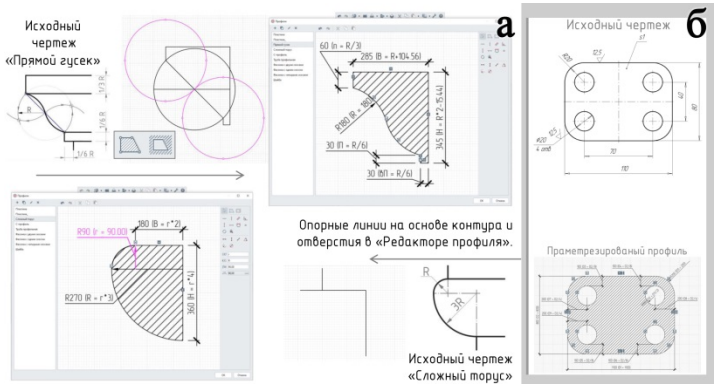


Рис. 2. Примеры по упражнениям второй ступени а) «Мулюры», б) Пластина

Выводы

Подводя итог, необходимо отметить, что комплекс заданий определяется задачами и направленностью процесса обучения, и строится на логике программного продукта. Программа Renga в основе организационной структуры базируется на закономерностях «интуитивно-понятного интерфейса [10]». Набор инструментов связан с главной настройкой стиля для объекта, а сам объект может иметь прописанные для него свойства; «простота» программы, определяет лишь поверхностное её применение для создания базы объекта, а работа с программой, как профессиональным инструментом информационного моделирования, требует глубокого и осмысленного понимания. Следовательно, можно говорить о следующей системе программы Renga, которая состоит из информационных классов, ориентированных на выполнение главной задачи – создания ЦИМ, прежде всего визуальных – информационно-графических; которые обладают рядом атрибутов, корректируемых и создаваемых в процессе работы. Основа всему «Стили», через них происходит наполнение модели конкретной информацией для экземпляра класса [11]. Следуя данному принципу успешное освоение программы, как BIM-системы, связано с владением инструментарием

управления стилем и свойством для объекта, а также с «Профилем», что неразрывно связано с предлагаемой ступенчатой системой обучения. Основа, которой эта работа с геометрией типовой и концептуальной, а далее информационное насыщение и визуальное представление ЦИМ. При формулировке и объяснении учебного комплекса важна выбранная методика, которая сочетает в себе словесные, наглядные, практические, репродуктивные, проблемно-ориентированные, эвристические и исследовательские методы. Различные приемы, такие как: инструкция-аналогия в графически-текстовом и видео формате; структурированная презентация из опорных слайдов: онлайн демонстрация требуемых решения задач моделирования; постановка проектно-конструкторской задачи; предваряющие практическую деятельность обучающихся лекционно-дискуссионные темы. В спектр тем, входят: «Общая информация и принципы работы в программе Renga», «Работа с компонентами программы при моделировании здания по чертежу», «Создание абстрактной модели и информационное насыщение проекта» [4].

Список использованной литературы

1. Поршнева Л. Современная стройка как элемент национальной безопасности // Отраслевой журнал «Строительство». 2021. №1-2. С. 5-9. URL: https://ancb.ru/files/pdf/pc/Otraslevoy_zhurnal_Stroitelstvo_-_2021_god_01_2021_pc.pdf (дата обращения: 03.04.2024)
2. Новые технологии в строительстве 2023 // Платформа PlanRadar. 11.08.2023 URL: https://www.planradar.com/ru/novye-tekhnologii-v-stroitelstve/#2.4 (дата обращения: 03.04.2024)
3. Кузнецова, О. Г. Обучение моделированию в соответствии с идеологией BIM-программ / О. Г. Кузнецова // КОГРАФ-2023 : Сборник материалов 33-й Всероссийской молодежной научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам, Нижний Новгород, 17–20 апреля 2023 года. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2023. – С. 74-80. – DOI 10.46960/kograph_2023_74.
4. Кузнецова, О. Г. Комплекс заданий для ТИМ в Renga / О. Г. Кузнецова, М. К. Решетников // Искусственный интеллект и цифровые технологии в подготовке специалистов для различных отраслей экономики : Сборник материалов Международной научно-практической конференции, Саратов, 21–23 мая 2024 года. – Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2024. – С. 159-167.
5. RENGA. БУКВАРЬ RENGA / RENGA® SOFTWARE. — Санкт-Петербург: RENGA®, 2022. – 335 с.
6. Практическое руководство пользователя Renga [Электронный ресурс]. – URL: https://manual.rengabim.com (дата обращения: 15.05.2024).

7. Одегов С. Renga Архитектура: Базовый уровень / Видео-курсы от Vysotskiy consalting [Электронный ресурс]. – URL: https://bim.vc/edu/courses/renga_arch_basic/ (дата обращения: 01.09.2024).
8. Слепнев П. Renga: Несущие конструкции / Видео-курсы от Vysotskiy consalting [Электронный ресурс]. – URL: https://bim.vc/edu/courses/renga-nesushchie-konstruktsii/ (дата обращения: 01.09.2024).
9. Кузнецова, О. Г. Представление концепта средствами BIM-программ / О. Г. Кузнецова // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры : Материалы VI Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 19–21 апреля 2023 года / Под общей редакцией А. А. Семенова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. – С. 69-75. – DOI 10.23968/BIMAC.2023.010.
10. Renga: офиц. сайт. – URL: https://rengabim.com (дата обращения: 24.04.2024).
11. Отечественная BIM-система Renga: обзор и впечатления // Рабочий журнал технократа. 11.02.2023 URL: https://dzen.ru/a/Y-dSmiwuiXaKMot1 (дата обращения: 03.04.2024)

УДК 624.011.14, УДК 624.05

ГРУЗОЗАХВАТНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ СТРОПОВКИ КОНСТРУКЦИЙ CLT

Лабудин Борис Васильевич [1], д.т.н., профессор, **Тарасов Вадим Леонидович** [2], асп.

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, набережная Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Российская Федерация, 163002; [1] sevned@mail.ru, [2] hsdog@yandex.ru

Аннотация. *Введение.* Определена актуальность совершенствования конструкций существующих и разработки новых грузозахватных приспособлений в Российской Федерации. Установлено, что в нашей стране эффективность операций по строповке деревянных конструкций значительно отстаёт от мирового уровня.
Цель исследования – обзор и оценка достижений в области эксплуатации современных грузозахватных приспособлений для строповки конструкций CLT в условиях строительной площадки.
Методы. В ходе исследования выполнен анализ конструкций применяемых грузозахватных приспособлений.

Результаты. Изучен зарубежный опыт применения грузозахватных приспособлений в строительстве по технологии CLT; выделены классы устройств: внедряемые в конструкцию груза и съёмные. Отмечено, что в России применяется наиболее простая и проверенная временем технология строповки, и по мере развития отечественных технологий строительства зданий с применением клееных деревянных конструкций будет возрастать потребность в внедрении, совершенствовании грузозахватных приспособлений.
Вывод. Проведённый обзор грузозахватных устройств, предназначенных для осуществления операций по строповке конструкций CLT в строительстве деревянных зданий и сооружений, обращает внимание российских исследователей, строителей и инженеров на разнообразие современных грузозахватных приспособлений за рубежом. В технологиях перемещения клееных деревянных конструкций в РФ ощущается отсталость, необходимо повышение эффективности операций строповки.
Ключевые слова: грузозахватное приспособление, строповка, технология, CLT, строительная площадка.

LOAD GRIPPING DEVICES FOR CLT STRUCTURES SLINGING

Labudin Boris Vasil'evich [1], D.Sc., Prof., **Tarasov Vadim Leonidovich** [2], Ph.D. student

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (Arkhangelsk, Northern Dvina Embankment, 17, 163002, Russian Federation), [1] sevned@mail.ru, [2] hsdog@yandex.ru

Abstract. *Introduction.* The relevance of improving the designs of existing and developing new load gripping devices in the Russian Federation is determined. It has been established that in our country, the efficiency of operations for slinging wooden structures lags far behind the world level.
The purpose of the study is to review and evaluate achievements in the field of operation of modern load gripping devices for slinging CLT structures under construction site conditions.
Methods. In the course of the study, an analysis of the designs of the used load gripping devices was performed.
Results. The foreign experience of using load gripping devices in construction using CLT technology has been studied; classes of devices have been identified: embedded in the cargo structure and removable. It is noted that the simplest and time-tested slinging technology is used in Russia, and as domestic technologies for buildings using glued wooden structures develop, the need for the introduction and improvement of load gripping devices will increase.

Conclusion. The conducted review of load gripping devices designed for carrying out operations for slinging CLT structures in the construction of wooden buildings and structures draws the attention of Russian researchers, builders and engineers to the variety of modern load gripping devices abroad. There is a feeling of backwardness in the technologies of moving glued wooden structures in the Russian Federation, and it is necessary to increase the efficiency of slinging operations.
Keywords: load gripping device, slinging, technology, CLT, construction site.

Введение

При строительстве зданий и сооружений перемещаются деревянные и клееные деревянные конструкции: балки, фермы, колонны, арки, плиты покрытий и стеновые панели, др. Новая европейская технология клееных деревянных панелей, обозначаемая аббревиатурой CLT (Cross-Laminated Tiimber), совершает революцию на строительном рынке [1], чем обуславливается применение новых технологических устройств, предназначенных для строповки деревянных конструкций при строительстве зданий. Появление новых многоэтажных деревянных зданий за рубежом вызывает большой интерес в России. «Обеспеченность сырьем, экономическая конкурентоспособность, спрос на конечную продукцию, наличие сложившегося международного опыта в производстве материала, строительстве по разнообразным типовым, индивидуальным, уникальным, архитектурным и конструктивным решениям, разработки нормативной документации, принимаемых государственных мер поддержки и соответствия к «зеленым» технологиям, позволяют говорить о большем потенциале развития направления отечественной строительной отрасли - деревянного домостроения» [2]. Этому также способствует развитие отечественной нормативной базы. Принятые в 2019 году СП 451.1325800.2019 и СП 452.1325800.2019 допускают применение CLT-панелей в зданиях высотой до 28 метров. На данный момент объём деревянного домостроения в России колеблется около 15% и каждый год возрастает. Кроме того, в [3] отмечается, что современной тенденцией является увеличение массы и габаритов строительных конструкций, что порождает необходимость в совершенствовании технологии строповки и применяемых грузозахватных приспособлений. Сегодня большое внимание уделяется вопросам производственного травматизма, актуально повышение уровня безопасности применяемых устройств и совершенствование отечественных нормативных документов [4].

Применение грузозахватных приспособлений при перемещении конструкций краном оказывает влияние на долю ручных операций персонала, занятого строповкой. В настоящее время наибольшее распространение получили стропы. Одним из применяемых способов для соединения конструкций CLT с крюком крана является строповка обвязкой универсальными ленточными стропами [5] (Рис.1).



Рис. 1. Строповка обвязкой гибким ленточным стропом

В [6] отмечается, что «строповка обвязкой сопряжена с реальным риском нестабильности из-за возможности соскальзывания строп во время подъема», и если стропы разведены под большим углом или конструкция имеет арочную форму и не имеет выступов, удерживающих стропы от соскальзывания, это может привести к ее падению [7]. Строповка обхватом гибким стропом требует доступа рабочего к конструкции с трёх-четырёх сторон [8], что усложняет операцию.

Популяризация строительства высотных деревянных зданий по технологии CLT за рубежом привела к применению новых грузозахватных приспособлений, используемых совместно с стропами, повышающих уровень механизации труда и упрощающих операции строповки деревянных конструкций, обеспечивая при этом сохранность их внешней поверхности.

Цель исследования – обзор и оценка достижений в области эксплуатации современных грузозахватных приспособлений для строповки конструкций CLT в условиях строительной площадки.

Методы

В ходе исследования, в соответствии с его целью, выполнен анализ конструкций современных зарубежных грузозахватных устройств.

Результаты и обсуждение

2.1. Захват ленточным стропом через монтажные отверстия

В настоящее время в Канаде применяется более совершенная технология захвата CLT панелей и плит через сквозные отверстия (Рис.2). Эти отверстия имеют диаметр около 50 мм и расположены относительно близко друг к другу, но не менее чем на расстоянии, равном толщине панелей CLT [6]. Панель обвязывается ленточным стропом и подвешивается к крюку, при этом необходимо несколько таких соединений для транспортирования панели.



Рис. 2. Строповка через монтажные отверстия (Канада)

2.2. Внедряемые в конструкцию груза приспособления

Применяется конструктивный ряд приспособлений, внедряемых в конструкцию перемещаемого груза и предназначенных для многоразового использования. Это оказывает деформационное влияние на деревянную конструкцию и вызывает зону концентрации напряжений, но груз имеет постоянный захват, и для выполнения операции захвата достаточно строп с крюком. Одним из примеров таких устройств является грузоподъёмный анкерный фиксатор Hebefix, внедряемый в конструкцию панелей и плит CLT с помощью шурупов и используемый в совокупности со съёмным шаровым опорным болтом с проушиной для захвата. Hebefix производится компанией Eurotec, в стандартном и «mini» вариантах [9]. Устройство предназначено для грузов с минимальной толщиной 60 мм, в зависимости от направления приложения нагрузки выдерживает от 6,5 кН до 10кН. Конструкция выполнена из углеродистой стали обыкновенного качества SJ235, наиболее близкой по характеристикам отечественному аналогу Ст3сп ГОСТ 380-2005. Анкерный фиксатор может внедряться в конструкцию CLT как с торца, так и в плоскости (Рис.3). Анализ отечественной технологии деревянного строительства не выявил применения приспособлений, конструкция которых схожа или соответствует Hebefix.

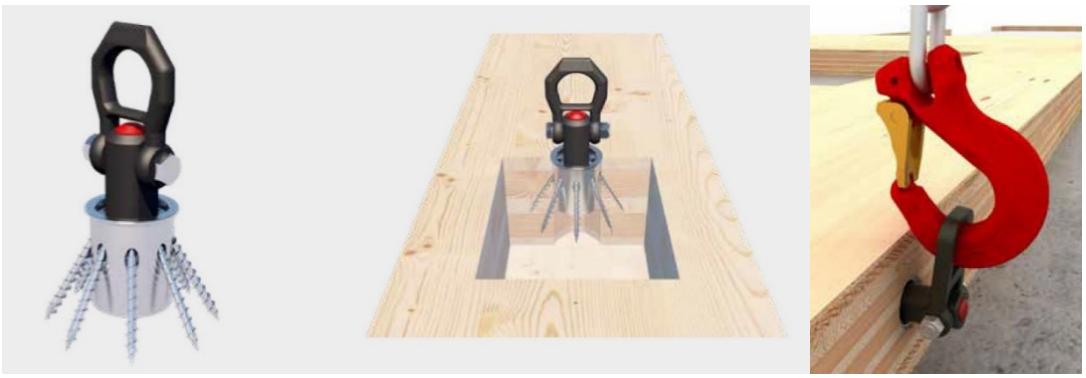


Рис. 3. Расположение Hebefix в CLT-панели (Германия)

Для более массивных CLT-конструкций предназначено устройство Eurotec TRILIFT (рис.4), имеющее тот же принцип действия, как Hebefix, но более развитую опорную поверхность и глубже внедряемое в конструкцию CLT. Для монтажа приспособления необходимо предварительное изготовление закладного паза, TRILIFT устанавливается с помощью шурупов, из которых центральные расположены по вертикальной оси изделия, боковые – под углом к вертикали. Применение осуществляется в совокупности с рым-болтом. Конструкция также выполнена из стали SJ235. Количество используемых для монтажа шурупов зависит от требуемой грузоподъёмности и направления действия нагрузки.

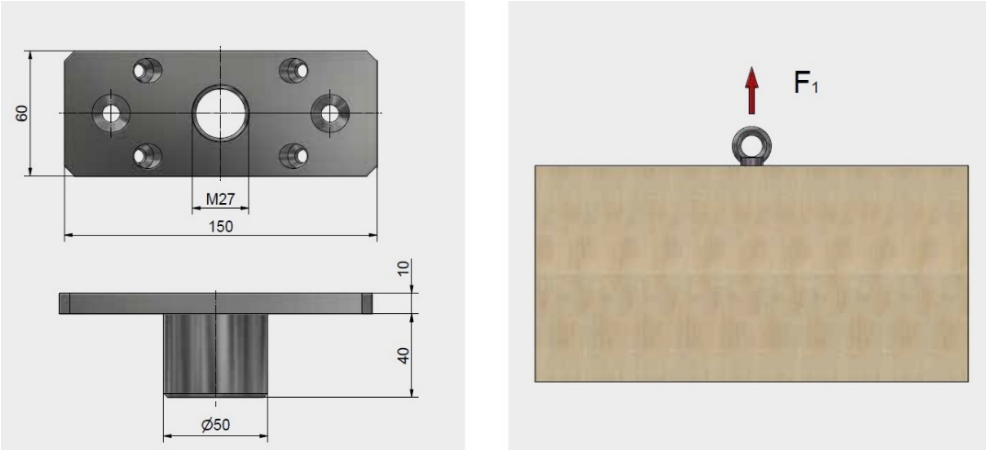


Рис. 4. Конструкция Eurotec TRILIFT (Германия)

Наиболее интересным решением, требующим предварительной подготовки транспортируемой панели, является применение закладных стальных стержней. Предварительное сверление отверстий в CLT-панели и монтаж стержня требуют высокой точности и соблюдения размеров. Подразумевается использование стропы, обматывающего закладной стержень и отрезаемого после завершения переместительных операций (Рис.5), или грузоподъёмного крюка, выполненного заодно с скобой. Стержень остается внутри панели, и отверстие должно быть заделано [6].



Рис. 5. Закладной стальной стержень в конструкции CLT-панели с гибким ленточным стропом (Канада)

2.3 Съёмные приспособления

Подгруппа таких изделий подразумевает аналогичное применение, но подразумевается необходимость демонтажа после завершения операций по перемещению груза. В английской литературе такие устройства обозначаются «Screw Hoist Systems» - винтовые грузоподъёмные захваты, их крепление к грузу осуществляется с помощью шурупов без предварительного сверления [10]. Винт предназначен для одноразового использования. Грузоподъёмность от 1,3 кН до 6 кН, для осуществления грузоподъёмных операций необходимо минимум два таких устройства (Рис.6). Это удобное и быстрое решение, но непременно оставляющее в конструкции зоны микродеформаций.



Рис. 6. Винтовые грузоподъёмные захваты бренда WASP (Италия)

Отмечается, что это одно из самых распространённых конструктивных решений в Европе, основано на технологии перемещения железобетонных конструкций [9]. Необходимо соблюдение технических характеристик и требований, заявленных производителем, для безопасной эксплуатации. В Канаде наиболее распространено [6] применение металлических пластин с такелажной скобой, присоединяемых к грузу с помощью нескольких шурупов (Рис.7). В пластинах выполняют от двух до двенадцати отверстий в зависимости от требуемой грузоподъёмности. Преобладает производство пластин с большим количеством отверстий для повышения универсальности их применения. Устройство предназначено для многоразового использования и отсоединяется от груза после завершения переместительных операций.



Рис. 7. Такелажные скобы с монтажной металлической пластиной (Канада)

Выводы

Проведённый обзор грузозахватных приспособлений, предназначенных для осуществления операций по перемещению конструкций CLT в строительстве деревянных зданий и сооружений, обращает внимание российских исследователей, строителей и инженеров на конструктивное разнообразие современных зарубежных устройств. В технологиях перемещения клееных деревянных конструкций в РФ ощущается отсталость, необходимо внедрение новых приспособлений с целью повышения уровня механизации труда. За последние годы в России проведен ряд исследований, направленных на совершенствование конструкций фрикционных грузозахватных устройств, обеспечивающих сохранность внешней поверхности груза, однако их применение при строительстве зданий и сооружений не рассматривалось в следствие их главного недостатка – малого диапазона ширины захвата [11]. Зарубежные грузозахватные приспособления являются простыми и надёжными, обеспечивают эффективность операций

строповки, с необходимостью доступа к конструкции только с одной стороны, в отличие от строповки обвязкой ленточным стропом. По мере развития технологий CLT и массового строительства высотных деревянных зданий в России рост потребности в применении новых устройств для строповки строительных конструкций будет возрастать.

Список использованной литературы

1. Косов И.И. Деревянные панели CLT в строительстве общественных зданий // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2019. № 2. С. 253-259.
2. Даутов Р.Р. Условия для развития в строительной отрасли России плит из перекрестноклееной древесины (CLT-панелей) // Инновационные аспекты развития науки и техники. 2020. № 3. С. 29-34.
3. Бабкин А.И., Руденко А.В. Особенности применения фрикционных грузозахватных устройств для перемещения конструкций из древесины // Научно-технические ведомости Севмашвтуза. 2017. № 1. С. 46–50.
4. Прусов А.Ю. Стандартизация грузозахватных приспособлений, текущее состояние // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. № 1 (67). С. 128-131.
5. Бабкин А.И. Совершенствование фрикционных грузозахватных устройств для перемещения деревянных конструкций: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2018. 174 с.
6. Erol Karacabeyli, Sylvain Gagnon Canadian CLT Handbook, 2019 Edition. Volume I. FPInnovations, 2019. PP. 635-706.
7. Бабкин А.И., Мелехов В.И., Руденко А.В., Морозов А.С. Экспериментальное определение коэффициента трения в контактных элементах грузозахватных устройств при перемещении клееных деревянных конструкций // Лесотехнический журнал. 2016. № 3 (23). С. 148-156.
8. Лихачев В.Д. Исследование и совершенствование технологии строительства сельскохозяйственных зданий из индустриальных деревянных конструкций: дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1979. 336 с.
9. Eurotec. Lifting and transport solutions. Access: https://www.eurotec.team/application/files/8517/1576/2205/Eurotec_Hebe-_und_Transportloesungen_210x297_EN.pdf (accessed 20.03.25).
10. Rothoblaas. WASP. Transport and lifting. Access: https://krepcom.ru/upload/2023_02_WASPL_EN.pdf (reference date: 20.03.25).
11. Щеголев В.Ю. Патентный анализ фрикционно-зажимных грузозахватных устройств // Автомобилестроение: проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства: Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции, Ижевск, 28–29 апреля 2022 года / Под ред. Н.М. Филькина. Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2022. С. 235–239.

УДК 691.322.7

АГРЕГАТНОЕ СОСТОЯНИЯ И СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ МИКРО- И НАНОКАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ – ЭФФЕКТИВНОЙ ДОБАВКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СУЛЬФАТОСТОЙКОСТИ БЕТОНА

Латыпов Валерий Марказович[1], д.т.н., профессор, **Нафиков Кирилл Денисович**[1], аспирант, **Нестеров Константин Михайлович**[2], к.ф.-м.н., доцент, **Луцык Екатерина Валерьевна**[1], к.т.н., доцент, **Латыпова Татьяна Владимировна**[1], к.т.н., доцент, **Зайцева Ляйсян Робертовна**[1], аспирант

[1] Уфимский государственный нефтяной технический университет, stexpert@mail.ru, kirill.nafickov2018@yandex.ru, 3505040@gmail.com, pavlenko_ufa@mail.ru, lesia_14@mail.ru

[2] Уфимский университет науки и технологий

Аннотация. Одной из тенденций развития строительных материалов является применение высокодисперсных добавок с целью получения бетона со сверхвысокими эксплуатационными характеристиками как по прочности, так и по долговечности. Карбонат кальция может рассматриваться в качестве добавки, повышающей стойкость бетона к сульфатной коррозии. Эффект от применения карбоната кальция складывается из двух факторов: 1) уплотнения цементной матрицы - для снижения проницаемости бетона; 2) взаимодействия карбоната кальция с продуктами гидратации цемента - с целью снижения доступных для взаимодействия с сульфатами алюминатных фаз цементного камня. В статье описан процесс сульфатной коррозии, рассмотрен механизм взаимодействия карбоната кальция с компонентами цементного камня и приведены результаты исследований поверхности различных форм карбоната кальция с использованием электронного микроскопа. Эффективность введения различных форм карбоната кальция зависит от степени его дисперсности и определяется высокой реакционной способностью поверхности материала.

Ключевые слова: Карбонат кальция, сульфатная коррозия, долговечность бетона, тонкодисперсные добавки, сульфатостойкие цементы.

THE AGGREGATE STATE AND SURFACE STRUCTURE OF CALCIUM MICRO- AND NANOCARBONATE, AN EFFECTIVE ADDITIVE FOR INCREASING THE SULFATE RESISTANCE OF CONCRETE

Latypov Valery Markazovich[1], D.Sc., Prof., **Nafikov Kirill Denisovich**[1], PhD student, **Nesterov Konstantin Mikhailovich**[2], Ph.D., Associate Professor, **Lutsyk Ekaterina Valerievna**[1], Ph.D., Associate Professor, **Latypova Tatiana**

Vladimirovna[1], Ph.D., Associate Professor, **Zaitseva Laysyan Robertovna**[1], PhD student

[1] Ufa State Petroleum Technical University, stexpert@mail.ru, kirill.nafickov2018@yandex.ru, 3505040@gmail.com, pavlenko_ufa@mail.ru, lesia_14@mail.ru

[2] Ufa University of Science and Technology

Annotation. One of the trends in the development of building materials is the use of highly dispersed additives in order to obtain concrete with ultra-high performance characteristics in both strength and durability. Calcium carbonate can be considered as an additive that increases the resistance of concrete to sulfate corrosion. The effect of using calcium carbonate consists of two factors: 1) cement matrix seals - to reduce concrete permeability; 2) interactions of calcium carbonate with cement hydration products - in order to reduce the available aluminate phases of cement stone for interaction with sulfates. The article describes the process of sulfate corrosion, examines the mechanism of interaction of calcium carbonate with the components of cement stone, and presents the results of surface studies of various forms of calcium carbonate using an electron microscope. The effectiveness of the introduction of various forms of calcium carbonate depends on the degree of its dispersion and is determined by the high reactivity of the surface of the material.
Keywords: Calcium carbonate, sulfate corrosion, durability of concrete, fine additives, sulfate-resistant cements.

Описание механизма сульфатной коррозии

Сульфатная коррозия относится к коррозии 3-го вида [1], разрушающее действие которой заключается в кристаллизации химических соединений (продуктов реакции) в порах и капиллярах цементного камня, увеличивающихся в объеме, что вызывает появление внутренних напряжений в камне и микротрещин. Дальнейший рост трещин обнажает новые поверхности цементного камня, способствуя развитию коррозионных процессов в трещине и ее росту до полного разрушения материала [2,3]. При этом на начальных стадиях процесса коррозии прочность бетона на какой-то период даже увеличивается за счет заполнения пустот новообразованиями [4]. Так же на начальной стадии, до накопления критического содержания сульфатов (4–5 % по SO3), вызывающего образование трещин, наблюдается кольматация пор, т.е. новообразования (гипс и эттрингит) выполняют положительную роль кольматанта, замедляющего диффузию сульфатов вглубь бетона.

Коррозионные процессы в сульфатной среде основаны на взаимодействии сульфат-ионов с гидроксидом кальция и гидроалюминатами цементного камня.

При достаточной концентрации сульфатов в жидкой среде происходит образование гипса с увеличением в объеме продуктов реакции в 2,34 раза.

$$Ca(OH)_2 + Na_2SO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + 2NaOH$$

В дальнейшем при взаимодействии гипса с продуктами гидратации трехкальциевого алюмината происходит образование эттрингита с увеличением объема продуктов в 4,8 раза.

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O + 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + 24H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$$

Такое увеличение объёма новообразований в порах затвердевшего цементного камня бетона приводит к его разрушению.

Механизм действия карбоната кальция

Механизм повышения сульфатостойкости при использовании карбоната кальция основан на сочетании эффекта микронаполнителя и химического взаимодействия с продуктами гидратации портландцемента. За счет химического взаимодействия происходит уменьшение количество трехкальциевого алюмината доступного для взаимодействия с гипсом для последующего образования основного деструктора при воздействии сульфатов – эттрингита [5].

Важным свойством карбоната кальция является высокая степень его физико-химического сродства с мономинералами цемента [6,7] и, вследствие этого, практически неизбежность физико-химического взаимодействия тонкомолотых карбонатов с алюминатной составляющей портландцемента даже при обычных температурах с образованием гидрокарбоалюминатов кальция. Положительный эффект от введения карбоната кальция проявляется также в ускорении гидратации других мономинералов портландцементного клинкера, что сопровождается общим ростом прочности цементного камня [8]. Кроме того, высокодисперсные карбонатные наполнители способствуют упрочнению наиболее слабой части структуры бетона – контактной зоны на границе «цементный камень – заполнитель», образуя здесь комплексные соединения с мономинералами цемента.

Снизить влияние C_3A и C_3S на склонность бетона к сульфатной коррозии можно введением добавок, вступающих во взаимодействие с C_3A и C_3S и продуктами их гидратации.

При введении $CaCO_3$ механизм повышения стойкости бетона к сульфатной коррозии заключается в следующем [9]. При гидратации цемента $Ca(OH)_2$ вступает в реакцию с C_3A, образуя гидроалюминат кальция

$$3Ca \cdot Al_2O_3 + Ca(OH)_2 + 12H_2O \rightarrow 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O, \qquad (1)$$

который, в свою очередь, реагирует с гипсом, образуя эттрингит:

$$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O + 3CaSO_4 \cdot 2H_2O + 17H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO4 \cdot 31H_2O + Ca(OH)_2 \quad (2)$$

При добавлении в бетонную смесь $CaCO_3$ может реагировать с гидратом алюмината кальция, образуя гидрокарбоалюминат кальция

$$3CaCO_3 + 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O + 19H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaCO_3 \cdot 31H_2O + Ca(OH)_2 \quad (3)$$

Затем гидрат карбоалюмината кальция с высоким содержанием кальция может взаимодействовать с гидратом алюмината кальция с образованием гидрокарбоалюмината кальция с низким содержанием кальция:

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaCO_3 \cdot 13H_2O + 2(4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O) \rightarrow 3(3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCO_3 \cdot 12H_2O) + 2Ca(OH)_2 + 19H_2O \quad (4)$$

При совместном рассмотрении уравнений (1), (3) и (4) можно получить:

$$3CaCO_3 + 31H_2O + 3CaO \cdot Al_2O_3 \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaCO_3 \cdot 31H_2O \quad (5)$$

$$CaCO_3 + 12H_2O + 3CaO \cdot Al_2O_3 \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCO_3 \cdot 12H_2O \quad (6)$$

Из уравнений (5) и (6) видно, что $CaCO_3$ взаимодействует с C_3A, что приводит к уменьшению количества «свободного» C_3A, вступающего в реакцию с сульфатами и приводящего к разрушению бетона по механизму коррозии бетона третьего вида [10].

В различных источниках в качестве рационального диапазона содержания карбоната кальция принимаются значения от 1 до 5% от массы цемента [5, 10]. По результатам наших исследований оптимальная дозировка $CaCO_3$ составляет от 2 до 4% от массы цемента.

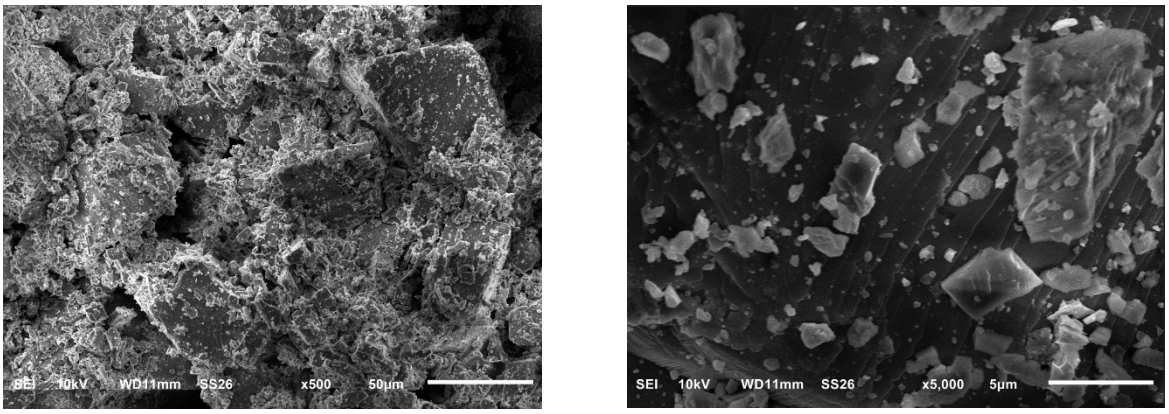
Анализ поверхности образцов

Исследование структуры поверхности карбоната кальция различных форм выполнено с использованием растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6610 LV. Перед помещением пробы в микроскоп производилось напыление слоя платины в течение 30 с при токе 30 мА в вакууме с давлением 3 Па. Съемка производилась при напряжении 10 кВ, WD=11 мм, SS26.

Результаты исследований

Молотый мрамор (Коелгамрамор) представляет собой тонкодисперсный минеральный карбонатный наполнитель, производимый путем измельчения и сепарации белого природного мрамора. Для его получения используется струйное, механическое и ультразвуковое измельчение. Молотый мрамор применяется в сухих строительных смесях,

резинотехнических изделиях, буровых растворах и напольных покрытиях. В представленном образце максимальный размер частиц D98 составляет 120-130 мкм, средний размер частиц D50 составляет 30-34 мкм. При рассмотрении порошка заметно разнообразие размеров частиц. Основную часть составляют крупные частицы размером от 20 до 100 мкм, которые «обсыпаны» многочисленными частицами пыли размерами до 5 мкм (рис. 1, а). Крупные частицы имеют угловатую кубическую форму. При ближайшем рассмотрении поверхности крупных частиц можно обнаружить наличие сколов, царапин и лещадок (рис. 1, б), наличие которых связано с механическим способом дробления образцов. Аналогичные дефекты поверхности имеются также на поверхности мелких частиц (рис. 2). Эти дефекты существенно повышают удельную площадь поверхности порошка и, вследствие этого, его реакционную активность по отношению к алюминатам цементного камня.



а) б)

Рис. 1. Молотый мрамор: а – общий вид, разнообразие размеров частиц; б – поверхность крупной частицы

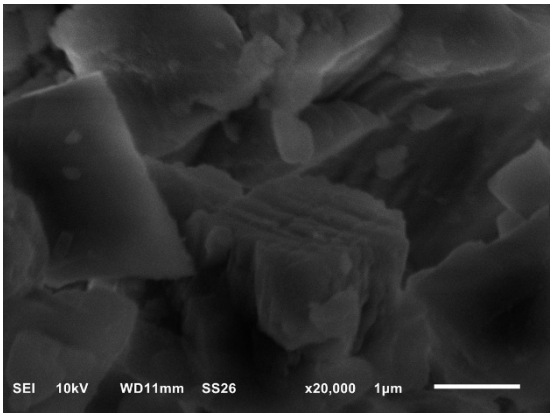
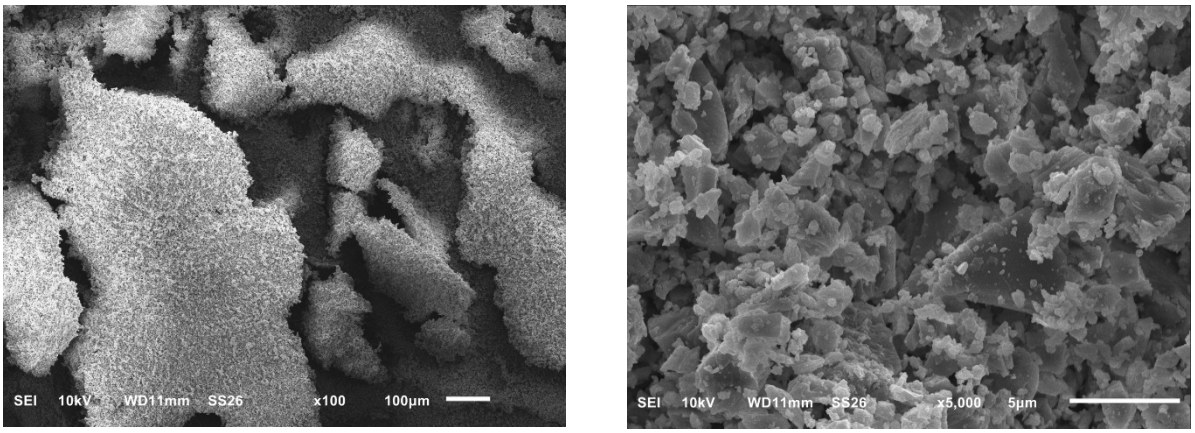


Рис. 2. Молотый мрамор. Поверхность мелкой частицы

Микрокальцит (МК-2) – это тонкодисперсный порошкообразный материал, который чаще всего используют в качестве наполнителя. Сырьем для его производства являются карбонатные породы, такие как мрамор, известняк и мел. Микрокальцит крупных фракций применяется при производстве сухих строительных смесей и буровых растворов, более мелкие

фракции микрокальцита применяются в качестве наполнителей пластмасс, эмалей и пигментов. Частицы материала конгломерированы и имеют «махровую» поверхность (рис. 3, а). Материал характеризуется неодинаковостью кристаллического строения частиц. Встречаются преимущественно два типа частиц: частицы кубической формы и частицы в форме лещадок (рис. 3, б, рис. 4).



а) б)

Рис. 3. Микрокальцит МК-2: а – общий вид агломератов, б – общий вид частиц

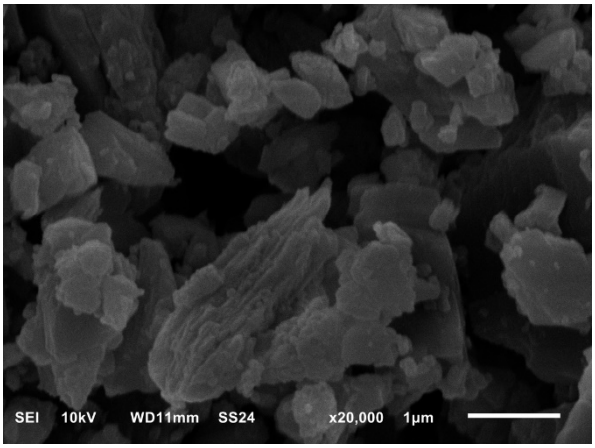
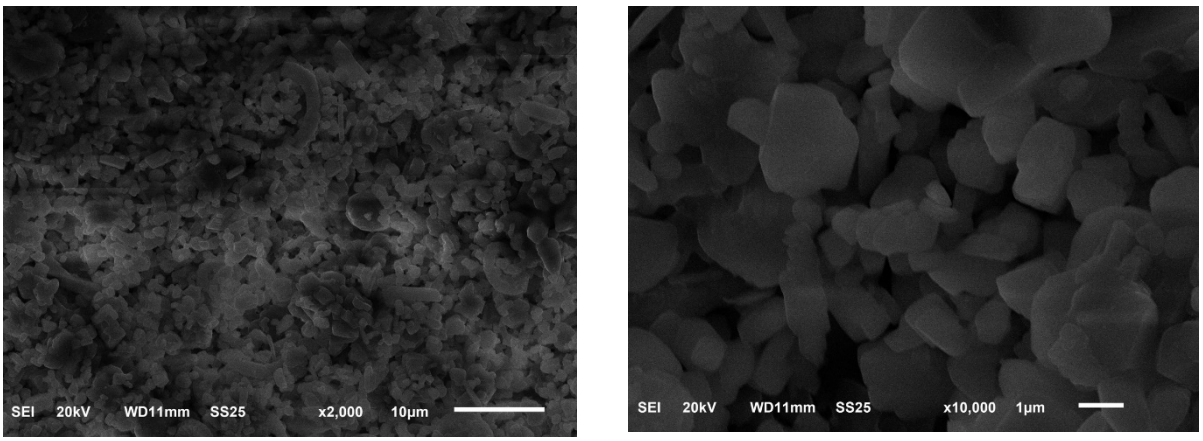


Рис. 4. Микрокальцит МК-2. Поверхность частиц

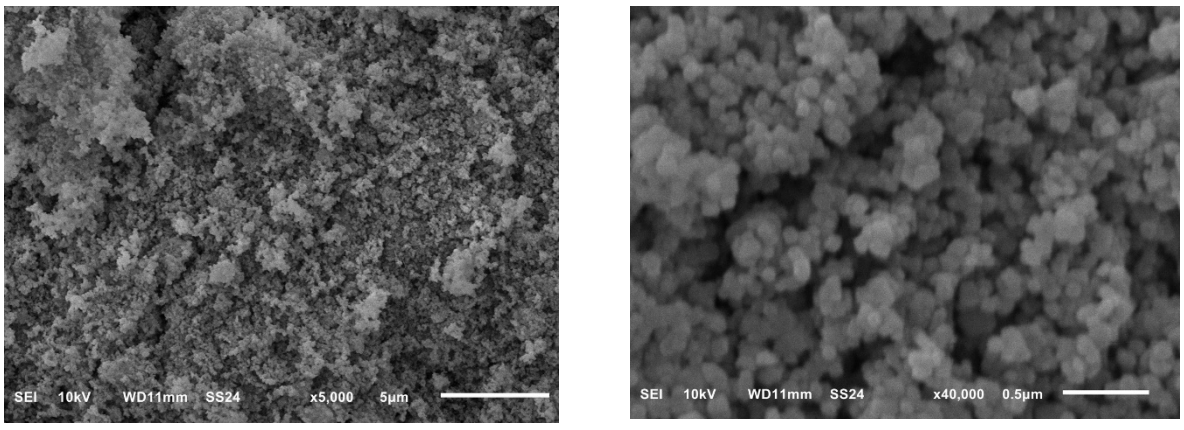
Тонкодисперный мел (МТД-2) – порошкообразный продукт, получаемый путем дробления, сушки, тонкого помола природного карбоната кальция. Применяется в качестве наполнителя в лакокрасочной, полимерной, стекольной промышленности и для производства строительных и отделочных материалов. Средний размер частиц МТД-2 составляет 5 мкм. Тонкодисперсный мел характеризуется высокой однородностью размеров частиц, однако встречаются и частицы размером до 22 мкм (рисунок 5, а). Форма частиц окатанная, поверхность гладкая (рисунок 5, б).



а) б)

Рис. 5. Мел МТД-2: а – общий вид части; б – поверхность частиц.

Нанокарбонат кальция (Calprec PR) применяется в качестве наполнителя при производстве клеев и герметиков, ПВХ, пластиках, красках и чернилах, смазках, резинах. Материалу свойственно сильное слипание частиц под действием сил Ван-дер-Ваальса, что видно как на изображениях, полученных в электронном микроскопе, так и непосредственно при взаимодействии с порошком (образование «горки» при накладывании порошка, его прилипание к ложке) (рис. 6, а). Материал характеризуется очень высокой однородностью, размер его частиц составляет от 30 до 70 нм (рис. 6, б).



а) б)

Рис. 6. Наноразмерный карбонат: а – общий вид; б – вид частиц

Заключение

1. Одним из наиболее важных положительных эффектов от введения в бетон карбоната кальция является уплотнение цементной матрицы, следствием которого является повышение долговечности бетона (ведь заполнитель в бетоне практически непроницаем). Учитывая, что размер частиц цемента составляет от 5 до 40 мкм, рационально в качестве микронаполнителя применять материалы с размерами, близкими к этому

диапазону или мельче. Все рассмотренные в статье материалы обладают данным свойством.

2. Наиболее перспективным является совместное использование в качестве добавок мела тонкодисперсного (МТД-2) – как наиболее распространенного и доступного материала, и нанодисперсного карбоната кальция (Calprec PR) – как наиболее тонкодисперсного материала.

Список использованной литературы

1. Москвин В. М., Иванов Ф. М., Алексеев С. Н., Гузеев Е. А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты // Стройиздат. 1980. 536 С.

2. Федосов С. В., Базанов С. М. Сульфатная коррозия бетона // Издательство АСВ. 2003. 192 С.

3. Алексеев С. Н., Иванов Ф. М., Модры С., Шиссль П. Долговечность железобетона в агрессивных средах // Стройиздат. 1990. 320 С.

4. Латыпов В. М., Латыпова Т. В., Луцык Е. В., Федоров П. А. Долговечность бетона и железобетона в природных агрессивных средах // РИЦ УГНТУ. 2014. 288 С.

5. Cao M., Ming X., He K., Li L., Shen S. Effect of Macro-, Micro- and Nano-Calcium Carbonate on Properties of Cementitious Composites — A Review // Materials. 2019.

6. Полак А. Ф. Твердение мономинеральных вяжущих веществ // Стройиздат. 1966. 207 С.

7. Бабушкин В. И., Матвеев Г. М., Мчедлов-Петросян О. П. Термодинамика силикатов // Изд-во литературы по строительству. 1972. 351 С.

8. Хозин В. Г., Хохряков О. В., Сибгатуллин И. Р., Гиззатуллин А. Р., Харченко И. Я. Карбонатные цементы низкой водопотребности — зеленая альтернатива цементной индустрии России // Construction Materials. 2014. № 5.

9. Ghabban A. A., Al Zubaidi A. B., Jafar M., Fakhri Z. Effect of Nano SiO2 and Nano CaCO3 on the Mechanical Properties, Durability and Flowability of Concrete // International Conference on Materials Engineering and Science. 2018. № 454.

10. Zhang M., Ma D., He J., Han Y. Sulfate corrosion resistance of foundation concrete with nano-particles // Magazine of Civil Engineering. 2023. № 119(3).

УДК 69.07

СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ УЗЛА СТЫКА НИЖНЕГО ПОЯСА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФЕРМЫ

Лисятников Михаил Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры строительные конструкции, **Львова Анастасия Михайловна***, магистрант кафедры строительные конструкции

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), anastasia-lvova@mail.ru

Аннотация. Анализ соединений в стальных конструкциях представляет собой актуальную проблему в современном строительстве, в особенности в регионах с высокой сейсмической активностью. Узлы стыков играют ключевую роль в обеспечении надежности и безопасности металлоконструкций, так как именно они подвергаются наибольшим нагрузкам при динамических воздействиях, таких как землетрясения. В данной статье рассматривается узел стыка нижнего пояса металлической фермы, который является одним из наиболее ответственных элементов конструкций. Целью исследования является оценка сейсмостойкостью узла стыка и разработка рекомендаций по его проектированию в условиях сейсмической активности.

Ключевые слова: металлическая ферма, узел стыка нижнего пояса, сейсмический район.

SEISMIC RESISTANCE OF THE JUNCTION OF THE LOWER BELT OF THE METAL TRUSS

Lisyatnikov Mikhail Sergeevich, Ph.D., Associate Professor of the Department of Building constructions, **Lvova Anastasia Mikhailovna*,** master's student of the Department of Building constructions

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), anastasia-lvova@mail.ru

Abstract. The analysis of joints in steel structures is an urgent problem in modern construction, especially in regions with high seismic activity. Joint assemblies play a key role in ensuring the reliability and safety of metal structures, as they are the ones that are most stressed during dynamic impacts such as earthquakes. This article discusses the junction of the lower belt of the metal truss, which is one of the most important structural elements. The purpose of the study is to assess the seismic

resistance of the junction and develop recommendations for its design in conditions of seismic activity.
Keywords: metal farm, junction of the lower belt, seismic area.

Введение

В современном строительстве приоритетное значение приобретает обеспечение устойчивости зданий и сооружений к различным внешним воздействиям, как природного, так и техногенного характера. Одним из ключевых факторов, влияющих на безопасность и долговечность строительных объектов, является сейсмическая активность. Землетрясения способны вызывать катастрофические разрушения, если здания не спроектированы и построены с учетом сейсмических рисков, что особенно актуально для сейсмоопасных регионов. В таких условиях возрастает потребность в использовании передовых технологий и методов проектирования металлических конструкций.

Методы

Слабым местом компонентного метода (КМ) является вычисление внутренних усилий и напряжений в элементах узла. Компонентный метод конечных элементов (КМКЭ), объединяющий в себе компонентную модель и классический метод конечных элементов (МКЭ), лишен этого недостатка.

Проверки отдельных составляющих узла (болтов или сварных швов) выполняются в соответствии с выбранными нормами проектирования [1].

Для элементов соединений стальных конструкций – сварных швов и болтов – требуются специально разработанные конечно-элементные модели, описывающие их поведение в составе узла. Все части 1D элементов и все дополнительные пластины моделируются элементами оболочек из металла (стали), который в большинстве случаев работает в нелинейной области (за пределами упругости) [2-4].

Реальная диаграмма работы стали заменяется упруго-идеально-пластической моделью, широко используемой в расчётах и проектировании. Преимуществом этой модели является то, что для описания поведения материала требуется только два параметра – предел текучести и модуль упругости. Максимальная относительная пластическая деформация конструкционной стали составляет 15%. В реальной практике проектирования ограничиваются пластической деформацией в 5% (1993-1-5 appendix C paragraph C.8 note 1). Напряжение в стали при использовании упруго-идеально-пластической модели не может превышать предела текучести (рис. 1).

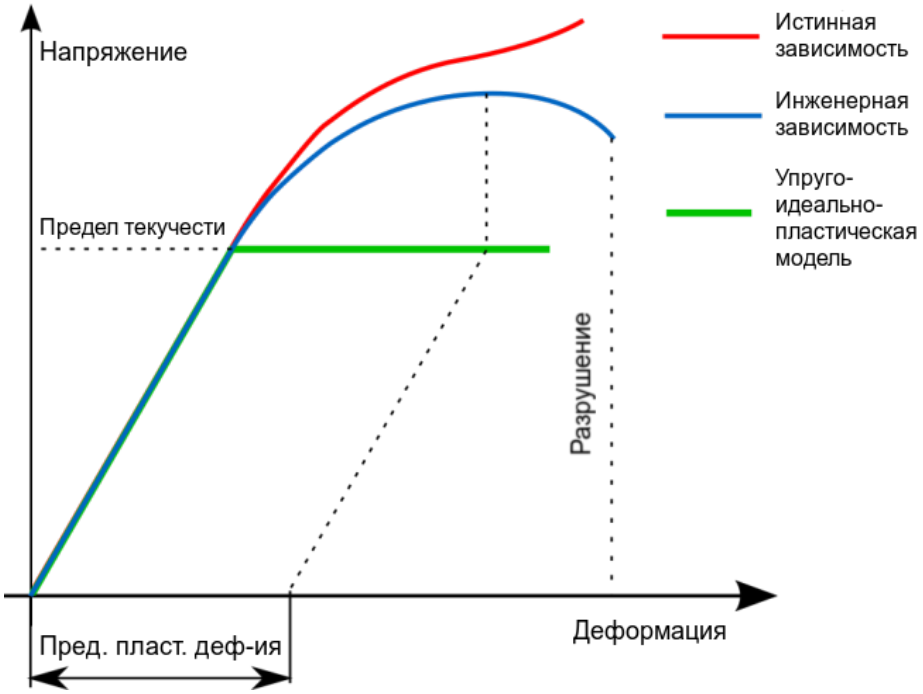


Рис. 1. Истинная диаграмма работы стали и упруго-идеально-пластическая модель

КМКЭ направлен на максимально точное приближение модели к реальности. Сетки КЭ пластин / стенок никак не связаны друг с другом, в отличие от расчётных моделей зданий и других конструкций. Сетка КЭ генерируется отдельно для каждой пластины независимо от других. Смежные сетки КЭ соединяются с помощью специальных интерполяционных кинематических ограничений. Эти ограничения обеспечивают связь между стороной одной пластины и стороной или поверхностью другой [5]. Такая уникальная расчётная модель показывает очень хорошие результаты – как по точности, так и по затраченному на расчёт времени. Данная методика защищена патентом.

Сварные швы моделируются специальными упругопластическими элементами, которые соединяются с интерполяционными кинематическими ограничениями. Элемент учитывает положение сварного шва, его ориентацию и размеры. Момент появления пластического течения отслеживается по величинам напряжений в сечении сварного шва. Благодаря учёту пластической работы материала шва пики напряжений перераспределяются на менее нагруженные участки по длине шва.

Болтовое соединение состоит из пакета двух и более пластин, скреплённых одним или несколькими болтами. Пластины располагаются свободно друг относительно друга. В расчётной модели между ними вставляются специальные контактные элементы, передающие только сжатие. При растяжении эти элементы выключаются из работы [6-9]. Сдвигающее усилие воспринимается смятием [10]. В программу встроена специальная модель для передачи смятия только вдоль направления сдвигающего усилия. В IDEA StatiCa Connection реализована проверка болтов на совместное

действие среза и растяжения. Поведение болта описывается зависимостями, показанными на рисунках ниже (рис. 2).

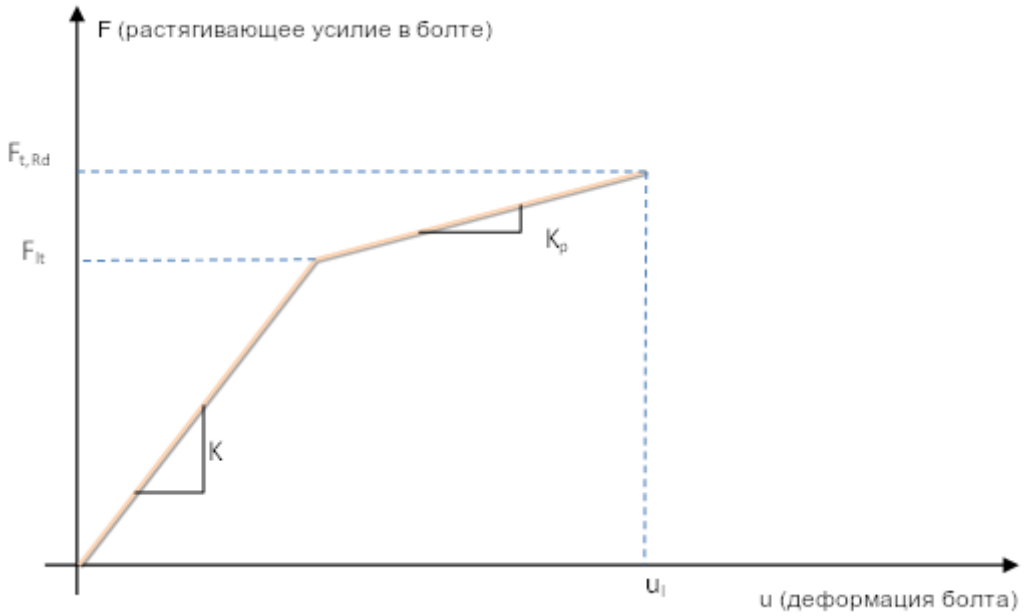


Рис. 2. Диаграмма работы болта при растяжении

Пояснения к используемым символам (рис.3):

- K – жёсткость болта при упругой работе
- Kp – жёсткость болта при пластической работе
- F_{lt} – предельное усилие в болте при упругой работе
- $F_{t,Rd}$ – предельное усилие в болте
- u_l – предельная деформативность болта

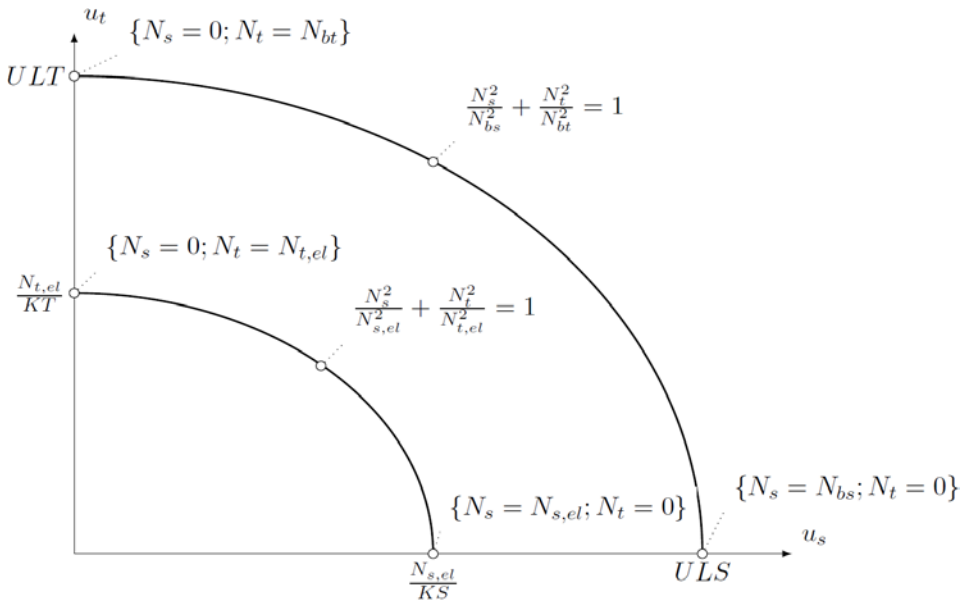


Рис. 3. Диаграмма несущей способности болта при совместном действии среза и растяжения

Расчётная КМКЭ-модель точно описывает реальную форму узла, в то время как величины внутренних усилий берутся из идеализированной пространственной стержневой КЭ-схемы, в которой балки и колонны моделируются по осевым линиям, а сопряжения этих элементов – просто узлами, не имеющими размеров.

В каждой пластине вычисляются эквивалентные напряжения и пластические деформации. При достижении предела текучести (делённого на коэффициент надёжности по материалу согласно Таблице 3 СП 16.13330.2017 и коэффициент условий работы по Таблице 1 СП 16.13330.2017 согласно п. 11.1.1), то есть, при выходе на вторую ветвь диаграммы работы стали (на полку), пластины проверяются по эквивалентным пластическим деформациям.

При построении конечно-элементной модели сварного шва учитывается пластическое поведение его материала. По результатам расчёта проверяется самый нагруженный элемент сварки. Проверка выполняется для двух случаев – по металлу шва и по металлу границы сплавления.

Усилия болтовых соединений рассчитываются на растяжение, сжатие и смятие.

Проведена инженерно-исследовательская работа по исследованию узла стыка нижнего пояса металлической фермы в сейсмическом районе.

Для исследования была создана расчетная модель в программе IDEA StatiCa Connection и проведен ее анализ.

В качестве объекта исследования было принята ферма покрытия административно-торгового здания. Ферма выполнена сечением нижнего пояса 150х5, сталь С255; верхний пояс выполнен сечением 180х140х5, сталь С255; крайние распорки-100х4, сталь С255; распорки-60х4, сталь С255 (рис. 4).

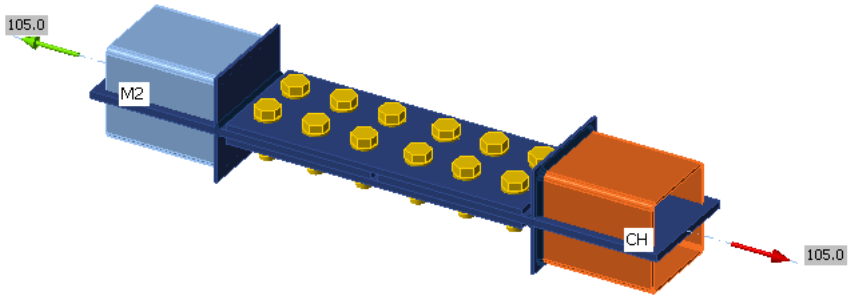


Рис. 4. Общий вид модели

В качестве нагрузки была принята равно уравновешенная сосредоточенная сила.

Результаты и обсуждение

2.1. Деформированная схема узла (до изменений)

Установлено, что данный узел не соответствует выбранному району – г. Сочи (см. рис. 5 и рис. 6).

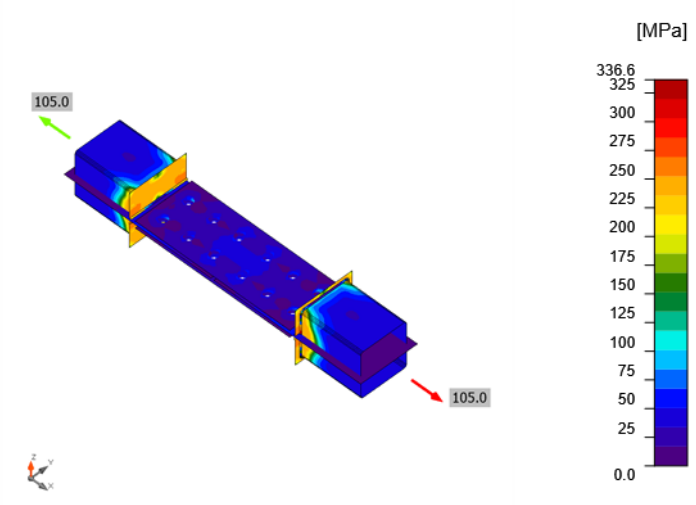


Рис. 5. Проверка по деформациям

Имя	Значение	Статус проверки
Пластины	6.1 > 5.0%	Не OK!
Болты	Конструирование	Не OK!
Сварные швы	Конструирование	Не OK!
GMNA	Вычислено	

Рис. 6. Краткий отчет

2.2. Деформированная схема узла (после изменений)

Данный узел после необходимых изменений будет выглядеть следующем образом (см рис. 7 и рис.8)

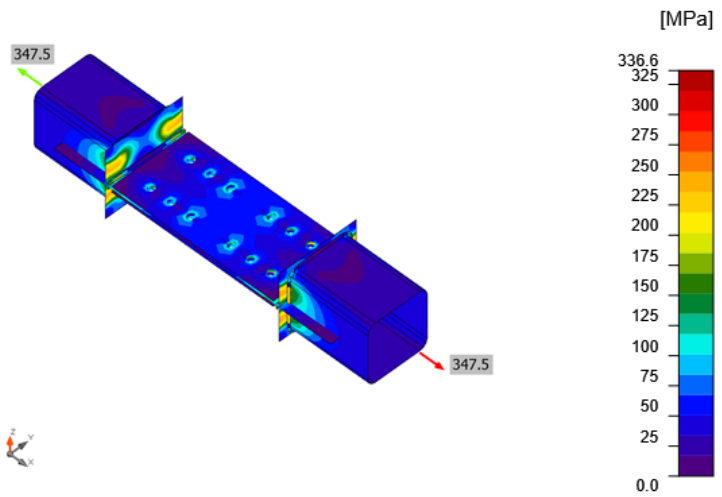


Рис. 7. Проверка по деформациям

Имя	Значение	Статус проверки
Пластины	0.1 < 5.0%	OK
Болты	37.2 < 100%	OK
Сварные швы	98 < 100%	OK
GMNA	Вычислено	

Рис. 8. Краткий отчет

Выводы

По результатам проведенного исследования установлено, что предложенный узел не соответствует данному сейсмическому району.

Для прохождения в г. Сочи в нем было изменено:

- расстояние болтов от центра было 45 мм стало 80 мм;
- толщина и габариты заглушки с t4x80x180 (C255) на t16x130x310 (C255);
- был заменен профиль трубы с 150x5 (C255) на 250x12 (C255) из-за таких параметров как: прочность по металлу шва и по металлу границы сплавления.

Список использованной литературы

1. Абдугаппаров Х. Разработка технологии сборки и сварки узлов фермы. – 2020.

2. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. "Сопротивление материалов" / М.: Высшая школа, 2003. – 560 с.

3. Алексеенко В.Н. "Проектирование, строительство и эксплуатация зданий в сейсмических районах". Учебное пособие для ВУЗов / под ред. Алексеенко В.Н., Жиленко О.Б. – М.: ИНФРА-М, 2020. – 224 с.

4. Беленя Е.И. "Металлические конструкции". – М.: Стройиздат, 1986.

5. Бирбраер А.Н. "Расчёт конструкций на сейсмостойкость " – СПб.: Наука, 1998. – 254 с.

6. Гарипов А.И., Пяткин А.П. "Методика расчета узлов стальных конструкций на сейсмическое воздействие" / Вестник гражданских инженеров, 2020. № 2 (79). – с. 51-59.

7. Тихонов С.М., Алехин В.Н., Беляева З.Б. и др. Проектирование металлических конструкций. Часть 1: "Металлические конструкции. Материалы и основы проектирования". Учебник для ВУЗов. / под общей редакцией Туснина А.Р. – М.: Издательство "Перо", 2020. – 468 с.

8. Туснин А.Р., Рыбаков В.А., Назмаева Т.В. и др. Проектирование металлических конструкций. Часть 2: "Металлические конструкции. Специальный курс". Учебник для ВУЗов. / под общей редакцией А. Р. Туснина. – М.: Издательство "Перо", 2020. – 436 с.

9. Иванова Ю.Е. и др. "Расчет металлической фермы" / Инновационное развитие науки и образования, 2019. – с. 60-62.

10. Поляков С.В. "Сейсмостойкие конструкции зданий" – М.: Высшая школа, 1983. – 304 с.

УДК 69.07

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОБЛЕГЧЁННЫХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЁННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОНОЛИТНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ

Михно Кирилл Сергеевич*, магистрант кафедры строительные конструкции, **Лисятников Михаил Сергеевич**, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), klonkira80@gmail.com

Аннотация. Железобетон является основным строительным материалом. Его применение в строительной сфере с каждым годом стабильно растёт. Монолитный железобетон открывает широкие перспективы архитектурной выразительности и индивидуальности сооружений. С конструктивной точки зрения позволяет добиться высоких прочностных характеристик и обеспечивает повышенный срок службы зданий. Мировые тенденции, направленные на разработку новых перспективных конструктивных решений, рационализацию и повышение эффективности работы, позволяют признать объект исследования актуальным. В данной статье комплексно рассмотрена проблема повышения несущей способности монолитных перекрытий зданий. Разработана методика одновременной рационализации применения бетона и арматуры в составе перекрытия с повышением прочностных характеристик конструктивного элемента. Проведён сравнительный анализ предложенных инновационных решений монолитных перекрытий по ряду параметров на различных величинах пролёта зданий. По результатам проведённой работы доказана актуальность практического применения данных методов, и обоснованы дальнейшие исследования в данном направлении.
Ключевые слова: монолитное перекрытие, железобетонное перекрытие, облегчённое перекрытие, предварительное напряжение, повышение несущей способности, рационализация, материалоёмкость.

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF LIGHTWEIGHT PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE MONOLITHIC FLOORS

Mikhno Kirill Sergeevich*, master's student of the Department of Building constructions, **Lisyatnikov Mikhail Sergeevich**, PhD, Associate Professor of the Department of Building Structures

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs,
(Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), klonkira80@gmail.com

Abstract. Reinforced concrete is the main building material. Its use in the construction industry is steadily increasing every year. Monolithic reinforced concrete opens up wide prospects for architectural expressiveness and individuality of structures. From a constructive point of view, it allows to achieve high strength characteristics and provides an increased service life of buildings. Global trends aimed at developing new promising constructive solutions, rationalizing them and improving work efficiency allow us to recognize the object of research as relevant. This article comprehensively examines the problem of increasing the load-bearing capacity of monolithic floors of buildings. A technique has been developed for the simultaneous rationalization of the use of concrete and reinforcement as part of the overlap with an increase in the strength characteristics of the structural element. A comparative analysis of the proposed innovative solutions for monolithic floors has been carried out for a number of parameters at various building span values. Based on the results of the work carried out, the relevance of the practical application of these methods is proved, and further research in this direction is justified.
Keywords: monolithic floor covering, reinforced concrete floor covering, lightweight floor covering, prestressing, increased load-bearing capacity, rationalization, material consumption.

Введение

Железобетон – композитный строительный материал, который состоит из двух основных компонентов: бетона и арматуры, которые в совместной работе обеспечивают высокую прочность, долговечность и устойчивость к различным нагрузкам. Как любой композитный материал железобетон сочетает в себе лучшие физико-механические характеристики составляющих его элементов, которые нивелируют недостатки друг друга. В данном плане железобетон один из самых ярких и наглядных примеров. Как известно бетон хорошо работает на сжатие и устойчив к нему, но плохо воспринимает растягивающие усилия. Арматура напротив устойчива к растяжению и так же хорошо работает на сжатие. Таким образом, в сочетании бетона и арматурной стали получается материал, отлично работающий на растяжение и сжатие с высокими прочностными характеристиками.

В настоящее время монолитный железобетон открывает широкие перспективы архитектурной выразительности и индивидуальности зданий и сооружений. Из железобетона изготавливается порядка 85% всех строительных конструкций. Столь широкое применение железобетона обусловлено уникальными свойствами материала, гибкостью его применения и практически неисчерпаемыми запасами сырья для его производства.

Из существующих технологий возведения зданий наиболее перспективным является монолитно-каркасное строительство. Суть технологии заключается в возведении непосредственно на строительной

площадке несущих элементов каркаса здания (фундамента, стен ядра жёсткости, перекрытий и колонн) из железобетона, в то время как самонесущие ограждающие конструкции (стены и перегородки) выполняются из других обычно более лёгких материалов. Применение монолитного многоэтажного безригельного каркаса является одним из перспективных направлений в строительстве жилья, административных зданий и других сооружений, как в России, так и за рубежом.

Технология монолитного каркасного строительства не лишена конструктивных недостатков. Главным из них считается большой собственный вес конструкций в целом и в частности монолитного перекрытия, выполненного сплошной плитой, который не позволяет проектировать пролёты повышенной величины. Проблема обостряется малой изученностью влияния усадочных деформаций бетона на напряженное состояние перекрытия, его ползучесть, трещиностойкость и прогибы под нагрузкой. Ввиду этого остро стоит вопрос повышения эффективности работы, оптимизации проектирования и рационализации материальных затрат на возведение монолитных перекрытий.

Методы

При проектировании плоских перекрытий на определённом этапе возникают ограничения, связанные с величиной перекрываемого пролёта. Это связано с тем, что с увеличением пролёта пропорционально возрастают и усилия в перекрытии, в частности изгибающие моменты и поперечные срезающие силы. В случае с монолитным статически неопределимым перекрытием моменты возрастают как в середине пролёта, так и в зоне над колонной. Поперечные срезающие силы действуют в зоне опирания на колонны. При пролётах более 10 м применение плоских перекрытий становится вовсе нецелесообразным.

Проблема увеличения пролёта плоских перекрытий не решается увеличением диаметра верхней и нижней арматуры, так как любое по размеру железобетонное сечение может принять в себя лишь ограниченное количество арматуры, и в случае достижения определённого процента наполнения сечения арматурными стержнями, конструкция перестаёт работать как железобетонный элемент. Это связано с тем, что сцепление арматуры с бетоном становится крайне неэффективным и неполным в виду особенностей их работы. Также не представляется возможным в строительных условиях качественно произвести бетонирование «переармированной» конструкции [1, 2].

Когда лимит армирования конструкции исчерпан, прибегают к увеличению поперечного сечения элемента. В случае монолитного перекрытия увеличение сечения может быть произведено только за счёт прироста высоты плиты. Соответственно увеличению поперечного сечения возрастают и моменты сопротивления перекрытия, что позволяет при том же количестве арматуры воспринимать большие усилия. Однако и этот метод

увеличения пролёта плоского перекрытия имеет определённый барьер. Увеличивая поперечное сечение, возрастает объём железобетонного перекрытия и как следствие прямо пропорционально растёт собственный вес конструкции. В конечном итоге при достижении определённой точки это приводит к тому, что в монолитной плите из-за увеличенной собственной массы возникают ещё большие усилия, которые в свою очередь целиком перекрывают преимущества увеличенного момента сопротивления. При этом сильно увеличивается материалоёмкость перекрытия, что в дальнейшем делает метод увеличения поперечного сечения экономически нецелесообразным.

Собственный вес конструкций играет важную роль в процессе проектирования зданий и сооружений. От его величины напрямую зависит полезная нагрузка, которую сможет воспринять та или иная конструкция. При увеличении пролёта и высоты сечения монолитной плиты перекрытия неуклонно растёт масса конструкции, которую необходимо убрать путём оптимизации сечения элемента. В случае жилых и общественных зданий, где необходимо сохранить высоту помещений и обеспечить ровный потолок без устройства обшивки, применение иных видов перекрытий (балочных, кессонных) не представляется целесообразным. Это связано с высотой их сечения, которое приводит к увеличению строительного объёма здания, что впоследствии скажется на эксплуатационных расходах здания [3-5].

В таком случае одним из способов снижения собственного веса является устройство пустот или облегчённых вкладышей в поперечном сечении элемента, что обеспечивает значительное снижение объёма бетона, требуемого на устройство перекрытия. К тому же уменьшенная масса перекрытия положительно сказывается на нижележащих конструкциях стен, колонн и фундамента. Суть метода облегчения перекрытия заключается в формуле момента сопротивления, из которой можно сделать вывод, что момент сопротивления увеличивается не только за счёт увеличения высоты сечения, но и за счёт правильного расположения материала в конструкции. Это означает, что момент сопротивления максимален, если большая площадь поперечного сечения элемента располагается как можно дальше от центра тяжести. По данному принципу реализованы наиболее эффективные формы сечений вроде прокатного двутавра в стальных конструкциях. Аналогично поступают и с железобетонным перекрытием, из области центра тяжести которого извлекают лишний бетон путем установки в тело плиты вкладышей. Наиболее близким по принципу работы с облегчённым монолитным перекрытием является сборная пустотная железобетонная плита с разницей лишь в том, что облегчённая монолитная плита выполняется в условиях строительной площадки и практически не имеет ограничений по форме, в то время как сборное пустотное – изделие заводского исполнения [6, 7].

На практике в большинстве случаев применяют безбалочные монолитные перекрытия, которые выполняются без предварительного натяжения арматуры, а армирование определяется исходя из расчёта

прочности нормальных сечений по методу предельного равновесия. Равномерная схема армирования верхней и нижней зоны плоского монолитного перекрытия проста с точки зрения проведения расчёта и производства работ, однако требует пристального внимания к выполнению норм по второй группе предельных состояний. Прежде всего, это касается предельных прогибов конструкции в центре ячейки, а также раскрытия трещин в приопорных зонах колонн. В результате чего при проектировании приходиться принимать увеличенную высоту сечения перекрытия и большее количество арматуры относительно расчёта по прочности, что выливается в перерасход арматурной стали и бетона. Этим же вызваны ограничения величины перекрываемых пролётов.

Наиболее эффективным методом решения при учёте всех ограничивающих факторов является предварительное напряжение арматуры. Оно может производиться как повсеместно, так и на отдельных проблемных участках плиты перекрытия, где это наиболее необходимо. Предварительно напряжённое армирование может быть сплошным, когда преднапряжённые стержни расположены по всей площади плиты. В таком случае значительно усложняется процесс монтажа перекрытия. Наиболее рациональным выглядит выборочное преднапряжение арматуры в трубчатой оболочке «Моностренд», когда армирование с преднапряжением осуществляется отдельными напрягаемыми стержнями или канатами. Принцип работы данного метода заключается в создании сжимающих усилий на бетон перекрытия, что позволяет частично или полностью нивелировать растягивающие напряжения в бетоне, которые возникают в момент нагружения конструкции полезной расчётной нагрузкой. Технически предварительное напряжение на бетон производится после бетонирования перекрытия и набора необходимой прочности бетоном. Арматуру, находящуюся в проектном положении в трубчатой оболочке тела плиты перекрытия, натягивают при помощи специализированных анкеров. Армирование такими стержнями возможно выполнять как по осям колонн, так и по диагонали. Совместное применение напрягаемой арматуры и арматуры без напряжения даёт возможность в случае необходимости произвести процесс регулировки натяжения канатов. Применение предварительного напряжения в перекрытии в значительной степени решает проблему прогибов трещинообразования, а также повышает общую жёсткость диска перекрытия [8-13].

Для подтверждения теоретической части предложенных методик повышения эффективности, рационализации и снижения материалоёмкости была проведена инженерно-исследовательская работа в виде сравнительного анализа включающего варианты плоских монолитных перекрытий: традиционное плоское, облегчённое вкладышами, предварительно напряжённое по ортогональным осям системой «Моностренд», а также комплексное, включающее в себя облегчение вкладышами и предварительное напряжение по ортогональным осям по системе «Моностренд». Конструкции монолитных перекрытий сравнивались по предельным прогибам, несущей

способности и материалоёмкости бетона. Для проведения расчётов использовался программный комплекс Stark ES 2019. Для проведения исследовательской работы были созданы расчётные модели каждого варианта перекрытия при различных величинах пролётов 6, 7, 8, 9, 10 м при равном осевом шаге с сеткой 5х5 ячеек в каждом направлении (рис 1). В качестве расчётной полезной нагрузки была принята распределённая по всей площади плиты нагрузка 480 кг/м², как характерная нагрузка для помещений залов собраний, совещаний и различных мероприятий, где могут применяться плоские перекрытия больших пролётов.

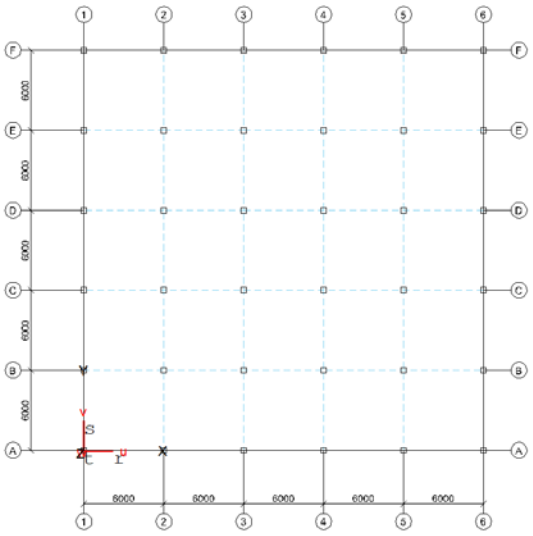


Рис. 1. Пример типовой расчётной схемы обыкновенного сплошного перекрытия с величиной пролёта 6 м.

Результаты и обсуждение

2.1. Исходные данные исследования 1

В таблице 1 представлены общие характеристики, принимаемые в расчёте перекрытия облегчённого вкладышами и перекрытия, облегчённого вкладышами с предварительно напряжённой арматурой по ортогональным осям системы «Моностренд».

Таблица 1. Характеристики облегчённых пустотных перекрытий

Величина пролёта, м	6	7	8	9	10
Высота перекрытия, м	0,24	0,28	0,32	0,35	0,38
Высота полок, м	0,06	0,06	0,06	0,06	0,065
Высота пустот, м	0,12	0,16	0,2	0,23	0,26
Ширина пустот, м	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Ширина рёбер, м	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

В таблице 2 представлены общие характеристики, принимаемые в расчёте традиционного плоского перекрытия и перекрытия с предварительно напряжённой арматурой по ортогональным осям системы «Моностренд».

Таблица 2. Характеристики рассматриваемых полнотелых перекрытий

Величина пролёта, м	6	7	8	9	10
Высота перекрытия, м	0,2	0,24	0,27	0,3	0,34

2.2. Анализ полученных результатов 2

По результатам исследовательской работы составлена таблица 3.

Таблица 3. Результаты сравнительного анализа плит перекрытий

Величина пролёта, м	Тип конструкции	6	7	8	9	10
Собственный вес перекрытия, т	Традиционное	495	809	1188	1672	2338
	Облегчённое	498	768	1120	1537	2023
	Предварительно. напр.	495	809	1188	1672	2338
	Облегч.+предв. напр.	498	768	1120	1537	2023
Прогиб от собственного веса, мм	Традиционное	3,97	5,44	7,6	10,13	12,36
	Облегчённое	2,37	3,26	4,3	5,81	7,46
	Предварительно. напр.	1,21	2,01	3,2	4,81	6,65
	Облегч.+предв. напр.	0,88	1,44	2,17	3,21	4,46
Прогиб от собств. веса и полезной нагрузки, мм	Традиционное	7,43	9,4	12,51	16,02	18,70
	Облегчённое	4,5	5,87	7,39	9,67	12,13
	Предварительно. напр.	2,16	3,33	5,12	7,42	9,9
	Облегч.+предв. напр.	1,58	2,47	3,6	5,18	7,07
Расход бетона, $м^3$	Традиционное	180	294	432	608	850
	Облегчённое	181	279	407	559	737
	Предварительно. напр.	180	294	432	608	850
	Облегч.+предв. напр.	181	279	407	559	737

Выводы

По результатам проведенного исследования установлено, что все представленные в работе методы повышения эффективности перекрытий, как по отдельности, так и в комплексе позволяют в разной степени решить проблему устройства большепролётных плоских монолитных железобетонных перекрытий. У облегчённых плит перекрытий эффект снижения собственной массы стабильно преобладает над снижением жёсткости сечения, вследствие замены части бетона на пустотообразователи. Прогиб от собственного веса и прогиб от суммарной нагрузки от собственного веса и полезной нагрузки у облегчённых перекрытий устойчиво ниже, чем у традиционного плоского перекрытия. С каждым последовательным увеличением пролётов использование пустотообразователей в теле облегчённых плит более значимо снижает материалоёмкость бетона, требуемого для их устройства, что также отражается и на собственной массе перекрытий, а, следовательно, и на прогибах конструкций. Предварительное напряжение по системе «Моностренд» отдельно и особенно в совокупности с применением пустотообразователей ожидаемо показала повышенную

устойчивость к прогибам.

Список использованной литературы

1. Ампилов, С.М. Опыт перспективы развития монолитного домостроения / С.М. Ампилов // Технологии, материалы, конструкции в строительстве. 2000. – №6. – С. 77-78.
2. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
3. Байков, В.Н. Железобетонные конструкции: общий курс / В.Н.Байков, Э.Е. Сигалов. – М.: Стройиздат, 1985. – 728 с.
4. Березовский, Б.И. Возведение монолитных конструкций зданий и сооружений / Б.И. Березовский, Н.И. Евдокимов, Б.В. Ждановский и др. // - М.: Стройиздат, 1981. – 335с.
5. Глуховский, А. Д. Железобетонные безбалочные бескапительные перекрытия для многоэтажных зданий / А.Д. Глуховский // — М.: Госстройиздат, 1956.
6. Евдокимов, Н.И. Технология монолитного бетона и железобетона / Н.И.Евдокимов, А.Ф.Мацкевич, В.С. Сытник // Учеб. пособие для строительных вузов. — М.: Высшая школа, 1980. – 335 с.
7. Залесов, А.С. Расчет прочности железобетонных конструкций при различных силовых воздействиях по новым нормативным документам // Бетон ижелезобетон. А.С. Залесов, Т.А. Мухамедиев, Е.А. Чистяков. – М., 2002. - №№3,4.
8. Мандриков, А.П. Примеры расчета железобетонных конструкций. Учеб. пособие для техникумов. - 2-е изд. / А.П. Мандриков // - М.: Стройиздат, 1989. – 506 с.
9. Мурашкин, Г.В. Совершенствование монолитного безригельного перекрытия / Г.В. Мурашкин, С.М. Анпилов, В.Г.Мурашкин, В.И. Фролов // Сб. Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте. – Самара, 2002, — С. 99.
10. Мурашкин, В.Г. Влияние усадочных деформаций на работу безригельного монолитного перекрытия / Г.В. Мурашкин // Актуальные проблемы современного строительства: материалы Всероссийской XXXI научно-технической конференции. — Пенза, 2001.
11. Данг Хань Ан Расчет и рациональное проектирование многоэтажных железобетонных зданий с оболочечными перекрытиями. – Санкт-Петербург – 2010. – 22 с.
12. Клованич, С.Ф., Мироненко И.Н. Метод конечных элементов в механике железобетона. // Одесса, 2007. 111 с.
13. Колчунов, В.И., Меркулов, Д.С. Методика экспериментальных исследований железобетонных элементов составного сечения, работающих в условиях изгиба с кручением // Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт». – Орел: ОрелГТУ, 2008. – № 1. – С. 24–26.

УДК 69.059.324.2

МЕТОДЫ УСИЛЕНИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К ПРОГРЕССИРУЮЩЕМУ ОБРУШЕНИЮ

Мартынов Владислав Алексеевич*, к.т.н., ассистент кафедры Строительные конструкции, **Кузина Анастасия Николаевна**, студент кафедры Автомобильные дороги

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), martinov3369@gmail.com

Аннотация. Проблема устойчивости зданий и сооружений к прогрессирующему обрушению становится всё более актуальной в связи с повышением требований к безопасности эксплуатации объектов. В тексте статьи приведены решения по усилению существующего здания командно-диспетчерского пункта (КДП), разработанные и примененные автором статьи в рамках реконструкции аэропортового комплекса «Чертовицкое» (г. Воронеж). По результатам поверочных расчетов здания, выполненных в программном комплексе «Лира 10.12», установлено, что при возникновении аварийных ситуаций, описанных в материалах обследования в виде исчезновения колонн, ригелей и локальных разрушений стен, происходит обрушение несущих элементов перекрытий и вышележащих конструкций. В результате выполненных мероприятий устойчивость и прочность несущих конструкций здания КДП на основные и особые (аварийная ситуация) сочетания нагрузок, с учетом принятых мер, обеспечена.
Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, реконструкция, усиление конструкций.

METHODS OF STRENGTHENING EXISTING BUILDING STRUCTURES FOR RESISTANCE TO PROGRESSIVE COLLAPSE

Martynov Vladislav Alekseevich*, PhD, Assistant Professor, Department of Building Structures, **Kuzina Anastasia Nikolaevna**, student of the Department of Highways

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), martinov3369@gmail.com

Abstract. The problem of resistance of buildings and structures to progressive collapse is becoming increasingly important due to the increasing requirements for the safety of facility operation. The text of the article presents solutions for strengthening the existing command and control center building, developed and applied by the author of the article within the framework of the reconstruction of the Chertovitskoye airport complex (Voronezh). According to the results of verification calculations of the building, performed in the Lira 10.12 software package, it was established that in the event of emergency situations described in the survey materials in the form of disappearance of columns, beams and local destruction of walls, the collapse of the load-bearing elements of the floors and overlying structures occurs. As a result of the measures taken, the stability and strength of the load-bearing structures of the command-and-control center building for the main and special (emergency situation) combinations of loads, taking into account the measures taken, is ensured.
Keywords: progressive collapse, reconstruction, strengthening of structures.

Введение

Проблема устойчивости зданий и сооружений к прогрессирующему обрушению становится всё более актуальной в связи с повышением требований к безопасности эксплуатации объектов. Прогрессирующим (лавинообразным) обрушением называют последовательное (цепное) разрушение несущих строительных конструкций, приводящих к обрушению всего сооружения или его частей вследствие начального локального повреждения [1]. Локальные повреждения могут произойти из-за конструктивных ошибок (ошибки проектирования, некачественные материалы, нарушения технологии строительства), из-за воздействий окружающей среды (экстремальные температуры, землетрясение), а также в результате внешних воздействий (механическое повреждение конструктивных элементов здания, чрезвычайная ситуация, умышленное повреждение объекта) [2].

Для предотвращения прогрессирующего обрушения могут использоваться следующие конструктивные решения: формирование дополнительных соединений между элементами, позволяющих равномерно распределять нагрузки в случае повреждения одного компонента конструкции; создание инженерных решений, направленных на ограничение повреждений внутри определенной области и предотвращения их распространения на остальные части конструкции; установка вспомогательных несущих элементов, способных воспринимать нагрузку при локальном повреждении [1].

Проектирование защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения осуществляется при аварийной расчетной ситуации вследствие предполагаемого начального локального разрушения, приводящего к изменению конструктивной схемы. Для этого необходимо выполнить расчет по особому предельному состоянию с учетом критериев, указанных в разделе

5 СП 385.1325800.2018, обеспечив несущую способность, деформативность и устойчивость формы деформации как конструктивной системы здания и сооружения в целом, так и отдельных элементов и узлов сопряжений.

Методы

В соответствии с требованиями СП 385.1325800.2018 расчетная схема и метод расчета определяются в каждом случае индивидуально и зависят от вида (характера) проектных решений здания или сооружения и исходных данных для проектирования. Расчетная схема должна выбираться с учетом наиболее существенных факторов, определяющих напряженно-деформированное состояние конструкций здания или сооружения и его основания. Целесообразно учитывать: пространственную работу; геометрическую, физическую (пластичность, ползучесть и др.) нелинейность [3-5].

Расчет защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения следует выполнять на особое сочетание нагрузок, включающее постоянные и длительные временные нагрузки, в том числе пониженные значения кратковременных нагрузок, с учетом изменения расчетной схемы здания и сооружения в результате локального разрушения.

Критерии обеспечения устойчивости здания при расчете на особое (аварийное) сочетание нагрузок значительно ниже, чем при расчетах по I и II предельному состоянию. К примеру, прогибы изгибаемых элементов конструктивной системы для особого предельного состояния при условии обеспечения минимально допустимой длины зоны опирания (анкеровки) не должны превышать 1/30 длины пролета, за исключением железобетонных конструкций, армированных высокопрочной арматурой с условным пределом текучести, для которых прогибы не должны превышать 1/50 длины пролета. При этом значения прогибов элементов конструкций при классическом расчете не должны превышать 1/200 длины пролета. Следовательно, при возникновении аварийной ситуации в здании конструкции могут иметь значительные деформации, но при этом не приводить к обрушению части здания или всей конструкции в целом [4-5].

Рассмотрим на примере выполненного проекта реконструкции здания КДП аэропортового комплекса «Чертовицкое» (г. Воронеж)». Здание с размерами в осях 12,98×75,58 м разновысотное: в осях 1-8/А-Д, 8-9/Г-Д, 9-13/А-Д – двухэтажное с холодным чердаком; в осях 8-9/А-Г – шестиэтажное.

Конструктивная схема здания выполнена: в осях 1-8/А-Д, 9-12/А-Д – с неполным каркасом, с поперечным расположением ригелей и центральным рядом колонн по оси Б; в осях 8-9/А-Д – с несущими поперечными стенами; в осях 12-13/А-Д – с несущими продольными стенами.

Пространственная жесткость здания обеспечивается совместной работой продольных и поперечных кирпичных стен, железобетонных колонн и жестких дисков перекрытий.

В осях 2-7, 10, 11 по оси Б расположены сборные железобетонные колонны. Вдоль осей 2-7, 10, 11 на колонны по оси Б и наружные стены по

осям А и Д опираются сборные железобетонные ригели перекрытий в уровне перекрытий 1 и 2 этажей.

Перекрытия здания выполнены: в осях 1-8/А-Д, 9-12/А-Д – из сборных железобетонных ребристых плит со вставками монолитных участков; в осях 8-9/А-Д с 1 по 4 этажи – из сборных железобетонных многопустотных плит со вставками монолитных участков; в осях 8-9/А-Д 5 этажа – монолитным железобетонным; в осях 12-13/А-Д – из сборных железобетонных многопустотных плит.

При возникновении аварийных ситуаций, описанных в материалах обследования в виде исчезновения колонн, ригелей и локальных разрушений стен происходит обрушение несущих элементов перекрытий и вышележащих конструкций.

Для предотвращения разрушения указанных конструкций проектом предусмотрено усиление несущих элементов здания, а именно устройство горизонтальных связей из арматурной стали в продольном и поперечном направлении, соединяющих отдельные элементы перекрытий между собой, и устройство стальных поясов с внешней стороны наружных стен в уровне перекрытий, являющихся опорой для наружных стен и вышележащих конструкций в случае возникновения аварийных ситуаций.

Стальные горизонтальные продольные и поперечные связи обеспечивают необходимую прочность дисков перекрытий и покрытия при растяжении и сдвиге за счет пластичности соединений сборных элементов в предельном состоянии.

Запроектированные мероприятия обеспечивают перераспределение вертикальных нагрузок при возникновении аварийной ситуации и предохраняют здание от прогрессирующего обрушения.

Результаты и обсуждение

Стальные горизонтальные продольные и поперечные связи обеспечивают необходимую прочность дисков перекрытий при растяжении и сдвиге за счет пластичности соединений сборных элементов в предельном состоянии [6-8].

В соответствии с п. 9.2.3 СП 385.13258000.2018, горизонтальные связи должны обеспечить восприятие усилий растяжения не менее 20 кН (2,0 тс) на 1 пог. м. фасада здания в плане.

В качестве горизонтальных связей в уровне перекрытий принимаем стержни из арматуры А400с по ГОСТ 34028-2016 с шагом:

- в осях 1-8/А-Д, 9-12/А-Д: в направлении цифровых осей – 1,5 м; в направлении буквенных осей – 3,0 м;
- в осях 8-9/Г-Д: в направлении цифровых осей – 3,0 м; в направлении буквенных осей – 2,04 м;

– в осях 12-13/А-Д: в направлении цифровых осей – 2,97 м; в направлении буквенных осей – 3,0 м.

Расчет несущей способности центрально-растянутых стальных связей производится по формуле:

$$N = A_n R_y \gamma_c \quad (1)$$

Нормативное сопротивление арматуры А400с:

$$R_y = 390\text{МПа} \approx 3975{,}5\ \text{кгс/см}^2 \quad (2)$$

Требуемая площадь поперечного сечения связей в осях 1-8/А-Д, 9-12/А-Д:

$$A_n = \frac{N}{R_y \cdot \gamma_c} = \frac{2000\text{кгс} \cdot 3{,}0\text{м}}{3975{,}5\text{кгс/см}^2 \cdot 1{,}0} = 1{,}509\text{см}^2 \quad (3)$$

Принимаем для связей в осях 1-8/А-Д, 9-12/А-Д арматуру ∅16 А400с по ГОСТ 34028-2016 с характеристиками: $A_S = 2{,}01\text{см}^3, q_\text{н} = 1{,}58\text{кг/м}$.

Требуемая площадь поперечного сечения связей в осях 8-9/Г-Д, 12-13/А-Д:

$$A_n = \frac{N}{R_y \cdot \gamma_c} = \frac{2000\text{кгс} \cdot 3{,}0\text{м}}{3975{,}5\text{кгс/см}^2 \cdot 1{,}0} = 1{,}509\text{см}^2 \quad (4)$$

Принимаем для связей в осях 8-9/Г-Д, 12-13/А-Д арматуру ∅14 А400с по ГОСТ 34028-2016 с характеристиками: $A_S = 1{,}54\text{см}^3, q_\text{н} = 1{,}21\text{кг/м}$.

Связи в осях 8-9/Г-Д, 12-13/А-Д соединяются с плитами перекрытий путем заделки (анкеровки) в бетоне. Требуемая расчетная длина анкеровки растянутой арматуры ∅14 А400с в бетоне кл. В25 составляет $l_{an} = 473$ мм согласно СП 63.13330.2018. В соответствии с п. 3.3 «Рекомендаций по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях» для обеспечения пластической работы соединения анкеровку связей рекомендуется рассчитывать на усилие в 1,5 раза большее, чем несущая способность самой связи.

Тогда длину анкеровки связей принимаем:

$l_{an} = 473 \cdot 1{,}5 = 709{,}5 \approx 710$ мм.

Примеры узлов анкеровки плит перекрытий представлены на рисунках 1-3.

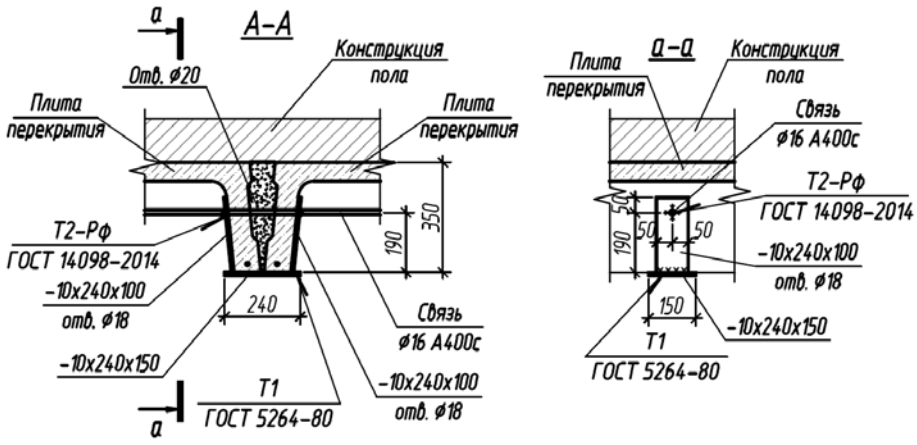


Рис. 1. Узел анкеровки ребристых плит

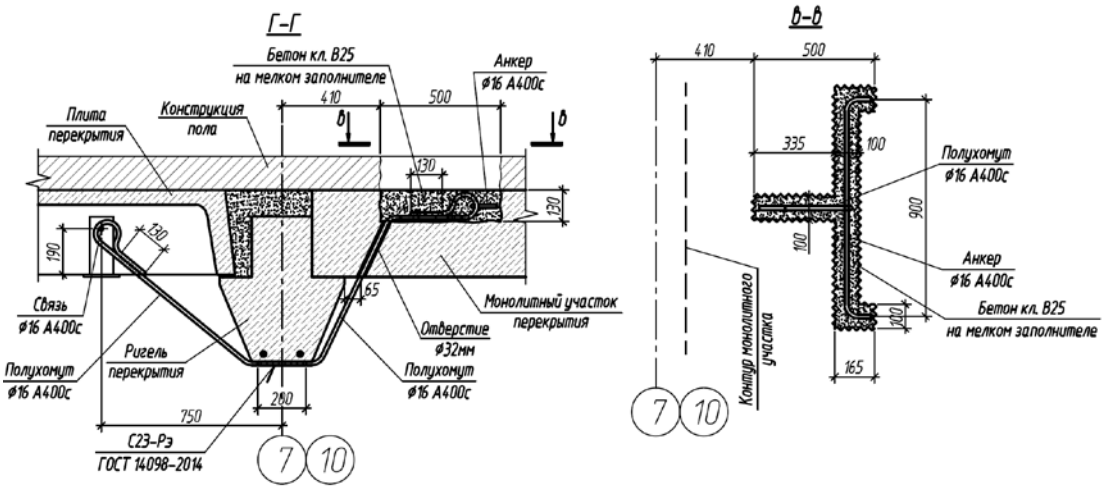


Рис. 2. Узел устройства связей ребристых плит с ригелем

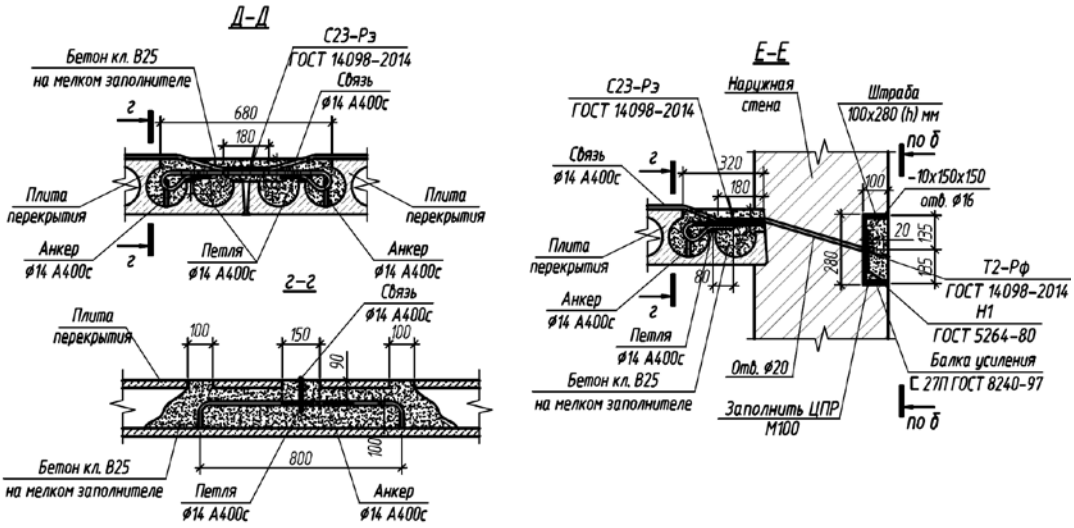


Рис. 3. Узел устройства связей многопустотных плит: Д-Д – между собой; Е-Е – с распределяющим поясом из прокатного швеллера

Стальные распределительные пояса обеспечивают перераспределение вертикальных нагрузок от вышележащих конструкций при возникновении аварийной ситуации и предохраняют здание от прогрессирующего обрушения.

Расчетная аварийная ситуация представляет собой исчезновение участка стены длиной 3 м, простенка длиной до 3 м, пересекающихся участков стен длиной по 3 м каждый или одной колонны, в результате чего происходит обрушение конструкций перекрытий и вышележащих конструкций.

В расчете учитываются постоянные и временные длительные значения нормативных нагрузок. Расчет произведен по I группе предельных состояний.

Расчет распределительных поясов перекрытий 1-го и 2-го этажей в осях 1-8, 9-12 по осям А и Д.

Суммарная длина участка исчезнувшей опоры стены – 5,55 м (исчезновение простенка в осях 5/А в уровне 1 этажа).

Расчетная схема балки распределительного пояса - однопролетная с защемлениями по концам.

Сбор нагрузок на распределительный пояс от собственного веса кирпичной кладки стены 2 этажа:

$$q = \frac{(4{,}58\text{м}\cdot 0{,}96\text{м} + 2{,}07\text{м}\cdot 2{,}36\text{м})}{5{,}55\text{м}} \cdot (1800{,}0\text{кгс/м}^3 \cdot 0{,}53\text{м} + 140{,}0\text{кгс/м}^3 \cdot 0{,}1\text{м} + 1700{,}0\text{кгс/м}^3 \cdot 0{,}03\text{м}) = 1704{,}2\text{кгс/м} \quad (5)$$

Максимальный момент на опоре распределительного пояса от действующей нагрузки [9-10]:

$$M_{max} = 4{,}375\text{тс} \cdot \text{м} \quad (6)$$

Нормативное сопротивление стали балок усиления С255:

$$R_y = 245\,\text{Н/мм}^2 \approx 2498\,\text{кгс/см}^2 \quad (7)$$

Требуемый момент сопротивления сечения балки усиления:

$$W_{\text{тр}} = \frac{M_{max}}{R_y \cdot \gamma_c} = \frac{437500\text{кгс}\cdot\text{см}}{2498\text{кгс/см}^2 \cdot 1{,}0} = 175{,}1\text{см}^3 \quad (8)$$

Принимаем сечение распределительного пояса из швеллера 27П ГОСТ 8240-97 с характеристиками: $W_x = 310\text{см}^3, q_{\text{н}} = 27{,}7\text{кг/м}$.

Максимальный момент, который способно воспринять сечение распределительной балки:

$$M_{ult} = 310\text{см}^3 \cdot 2498\,\text{кгс/см}^2 = 774380\text{кгс}\cdot\text{см} \approx 7{,}744\text{тс}\cdot\text{м}$$
$$M_{ult} > M_{max} = 4{,}375\text{тс}\cdot\text{м} \quad (9)$$

Условие выполняется.

Выводы

В результате выполненных мероприятий, частично представленных в данной статье, при анализе пространственной модели здания КДП в программном комплексе «Лира 10.12» установлено, что с учетом предложенных конструкций усиления при возникновении аварийных ситуаций в виде исчезновения вертикальных несущих конструкций и ригелей перекрытий, обрушений конструкций перекрытий и вышележащих конструкций не происходит, что подтверждает устойчивость здания к прогрессирующему обрушению. Максимальные значения прогибов элементов не превышают предельно допустимые значения, установленные п. 4.5.2 СП 385.13258000.2018 для особого предельного состояния, равные 1/30 длины пролета. Устойчивость здания против прогрессирующего обрушения обеспечена. Следовательно, данные решения по усилению конструкций перекрытия и покрытия здания можно считать эффективными и рекомендуемыми к применению при реконструкции зданий повышенного уровня ответственности (КС-1).

Список использованной литературы

1. Abdullah, Hussein & Алёхин, Владимир & Плетнёв, Максим. (2023). Прогрессирующее обрушение: факты, возможные причины, оценка методов анализа по расходу материалов Progressive Collapse: Facts, Potential Causes, Evaluation of Analysis Methods by Materials Consumption. Scientific Journal “Academia Architecture and Construction”. 153-158. 10.22337/2077-9038-2023-4-153-158.
2. Туснина, Ольга. (2021). Выбор аварийных ситуаций при расчете на прогрессирующее обрушение промышленного здания. Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo. 60-65. 10.33622/0869-7019.2021.09.60-65.
3. Сафаров, Азиз & Дорожинский, Владимир & Андреев, Владимир. (2024). Верификация расчетной модели железобетонной рамы при расчете на устойчивость к прогрессирующему обрушению. Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo. 58-64. 10.33622/0869-7019.2024.04.58-64.
4. Еремеев, Павел. (2022). Методы проектирования на прогрессирующее обрушение: гармонизация российских и международных нормативных документов. Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo. 23-28. 10.33622/0869-7019.2022.04.23-28.
5. Еремеев, Павел & Лебедева, Ирина. (2021). Мониторинг и анализ нормативных документов по проектированию конструкций с учетом прогрессирующего обрушения. Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo. 15-21. 10.33622/0869-7019.2021.12.15-21.

6. Zavyalova, Olga & Zavyalov, Roman. (2024). Способы усиления одноэтажного промышленного здания, оборудованного мостовым краном, при защите от прогрессирующего обрушения. Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region. 5-10. 10.52684/2312-3702-2024-47-1-5-10.
7. Volkov, A. & Nedorezov, Andrei. (2025). Усиление железобетонных конструкций. Учебно-методическое пособие для СПО. 10.23682/125746.
8. Шмойлов, Евгений & Чурсова, Лариса & Федотов, Михаил & Кальгин, Александр. (2024). Композитные системы внешнего армирования для усиления строительных конструкций. Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo. 44-51. 10.33622/0869-7019.2024.01.44-51.
9. Кашеварова Галина, Тонков Юрий, (2022). Экспертная система для практической диагностики строительных конструкций. Scientific Journal “Academia Architecture and Construction”. 85-91. 10.22337/2077-9038-2022-2-85-91.
10. Орлов В.Н., Чичурин А.В., Ковальчук О.А., Теплых А.В., Колесников А.В. (2022). Математическое моделирование и расчет строительных конструкций. 10.22227/978-5-7264-3000-3.2022.224.

УДК 69.059.2

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОКРЫТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗДАНИЯ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Медведев Евгений Константинович*, ассистент кафедры строительных конструкций, **Гоньшаков Александр Геннадьевич**, к.э.н., доцент кафедры строительных конструкций, **Куприянов Алексей Евгеньевич,** магистрант кафедры строительных конструкций

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), kp.ekm.13@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного обследования и реконструкции покрытия производственного здания фармацевтического назначения, возведённого в посёлке Вольгинский, Петушинский район, Владимирская область. Подробно описана конструктивная схема покрытия здания, включающая стропильные ноги и стойки, и текущее состояние кровельного покрытия. Проведены визуальные и инструментальные, расчётные проверки состояния элементов кровли и качества узлов сопряжения элементов между собой. С использованием метода конечных элементов выполнен анализ несущей способности конструкций, подтверждающий их

способность выдерживать современные нормативные нагрузки. Выявлены дефекты кровельного покрытия, включая сквозные разрушения и загнивание деревянной обрешётки. На основе результатов обследования разработаны рекомендации по замене кровельного покрытия на современные материалы и полной замене деревянной обрешётки для обеспечения долговечности, и безопасности эксплуатации здания.
Ключевые слова: реконструкция, покрытие здания, деревянные конструкции, стропила, несущая способность, метод конечных элементов.

RECONSTRUCTION OF THE COVERING OF A PRE-REVOLUTIONARY PRODUCTION BUILDING

Evgeny Konstantinovich Medvedev*, Assistant Professor, Department of Building Structures, **Alexander Gennadievich Gonshakov**, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Department of Building Structures, **Kupriyanov Alexey Evgenievich**, Master's student of the Department of Building Structures

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), kp.ekm.13@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a comprehensive survey and reconstruction of the roofing of a pharmaceutical production building, which was constructed in the village of Volginsky, Petushinsky District, Vladimir Region. The article provides a detailed description of the structural design of the building's roofing, which includes rafters and posts, as well as the current condition of the roofing. Visual and instrumental inspections, as well as computational checks, were conducted to assess the condition of the roofing elements and the quality of their joints. Using the finite element method, the load-bearing capacity of the structures was analyzed, confirming their ability to withstand modern regulatory loads. Defects in the roofing were identified, including through-holes and rotting of the wooden battens. Based on the survey results, recommendations were developed for replacing the roofing with modern materials and completely replacing the wooden battens to ensure the longevity and safety of the building.
Keywords: reconstruction, building coverage, wooden structures, rafters, load-bearing capacity, finite element method.

Введение

Здание производственного назначения прямоугольной формы с габаритными размерами в осях 66.26×30.0 м. Высота здания в коньке 11,51 м. Конструктивная схема здания – бескаркасная, с наружными и внутренними несущими стенами. Пространственная жёсткость здания в целом обеспечивается жёсткой системой вертикальных продольных и поперечных

стен и горизонтальных плит перекрытий, образующих единую пространственную систему [1].

Несущими элементами покрытия здания является система стропильных ног, опирающихся на стойки с определённым шагом. Пространственная неизменяемость стропильной системы здания обеспечивается за счёт системы вертикальных связей, расположенных как в плоскости, так и из плоскости стропил, и за счёт жёсткого сплошного диска, образованного прогонами. Прогоны выполнены из бруса 200×200 мм, стропильные ноги из бруса 250×100, стойки из бруса 150×150 мм. Учитывая действующие расчётные снеговые нагрузки, сечение прогонов достаточно для безопасной эксплуатации [2], что согласуется с современными подходами к расчёту и проектированию деревянных стропильных конструкций [3].

Общий вид обследуемого покрытия здания представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид покрытия здания

Покрытие кровли выполнено стальными кровельными листами по сплошному деревянному настилу из досок. При осмотре кровли выявлены места сквозного разрушения покрытия, деревянный настил имеет повсеместное загнивание (рис. 2, 3) и требует замены [4,5]. Состояние кровли неудовлетворительное.

У одного из торцов покрытия выполнено светоаэрационное окно габаритами 2×1.9 м.



Рис. 2. Загнивание деревянного настила



Рис. 3. Загнивание элементов обрешётки и прогона покрытия

Целью работы является оценка состояния стропильной конструкции покрытия при помощи визуального, инструментального и численного методов, разработка рекомендаций по устранению выявленных дефектов кровли.

Методы

Проверка состояния стропильной конструкции покрытия выполнялась в несколько этапов:

- визуально фиксировалось наличие повреждений рассматриваемых элементов: трещины, загнивание, изменение формы поперечного сечения, сколы; наличие деформаций элементов, общее состояние выполненных узлов сопряжения элементов между собой;

- инструментально выполнялось определение геометрических размеров сечений исследуемых элементов и фактическое их расположение в покрытии;

- при помощи метода конечных элементов выполнялся поверочный расчёт для определения фактического коэффициента использования стропильной конструкции на расчётные нагрузки, согласно действующим нормативным документам.

Несущая способность стропильной конструкции с учётом новых нагрузок определялась методом конечных элементов в программном комплексе ЛИРА.

Результаты и обсуждение

Существующие сечения элементов стропильной конструкции с учётом прошедшего времени эксплуатации и состояния узлов соединения имеют достаточную несущую способность для восприятия действующих нагрузок [6,7]. Результаты полученных усилий приведены на рис. 4 – 7.

В результате оценки состояния покрытия рекомендуется выполнить его частичную замену с целью устранения дефектов, выявленных в ходе проведения обследования.

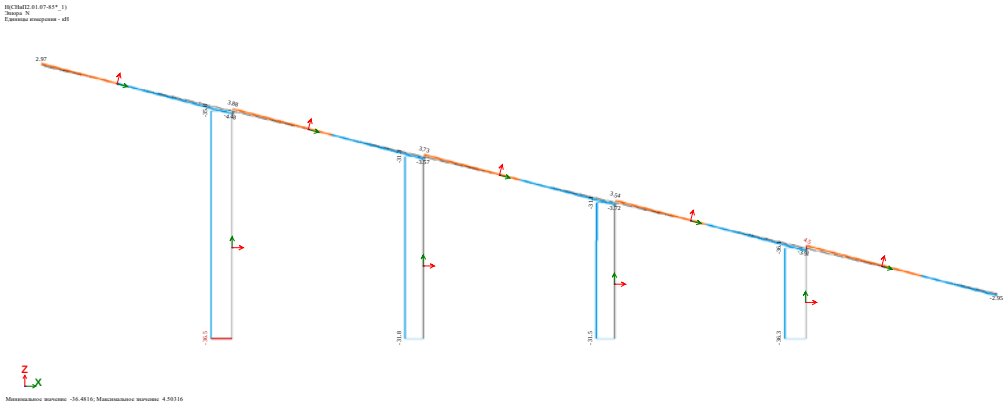


Рис. 4. Нормальные усилия N в элементах стропильной конструкции

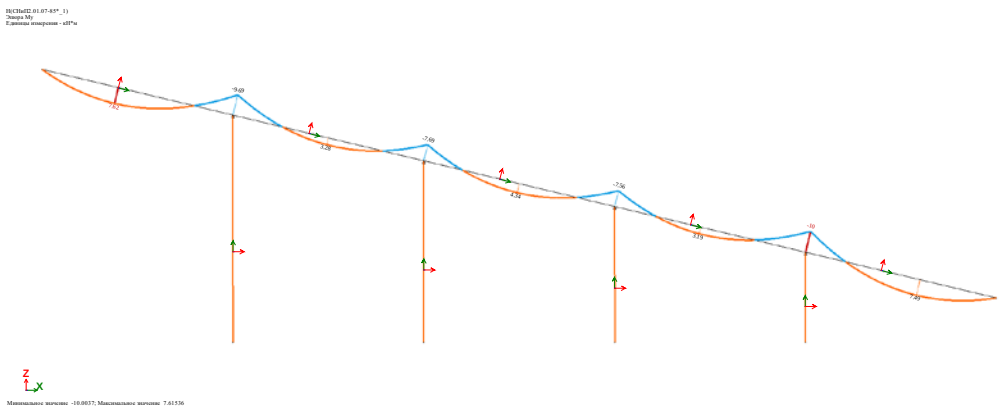


Рис. 5. Изгибающий момент M_Y в элементах стропильной конструкции

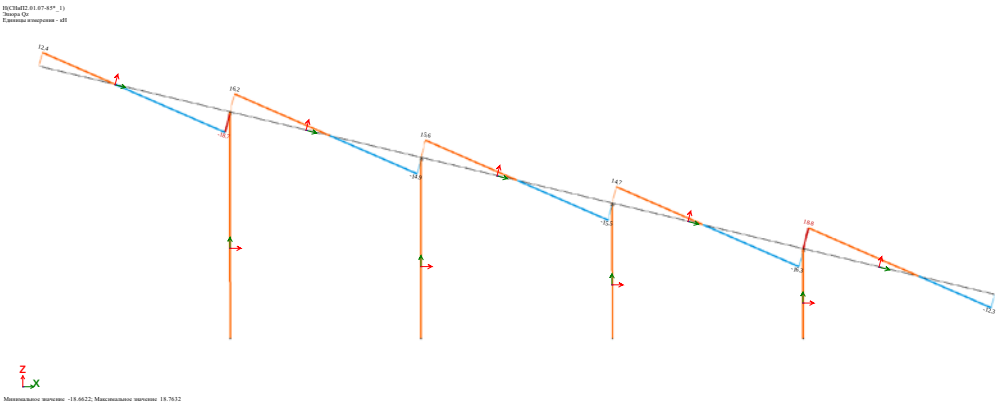


Рис. 6. Поперечное усилие Q_Z в элементах стропильной конструкции

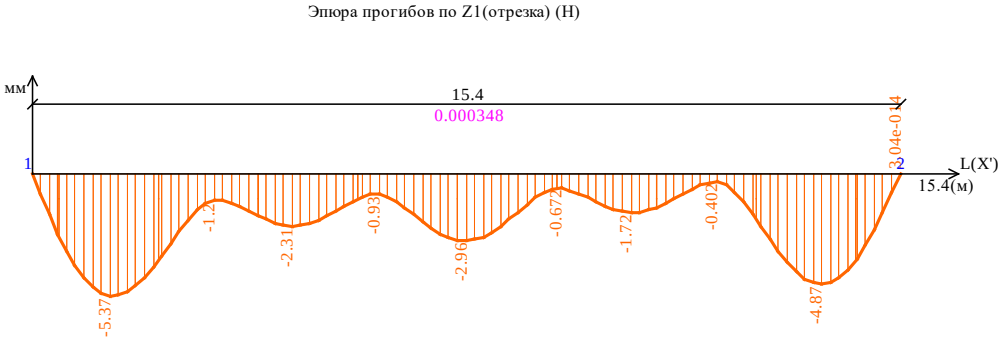


Рис. 7. Эпюра вертикальных перемещений

В частности, элементы стропильной системы по расчёту по первому предельному состоянию (по нормальным, касательным и приведённым напряжениям) имеют достаточную несущую способность с учётом коэффициентов надёжности. А именно, процент использования по нормальным напряжениям составляет 78%, по касательным 7%, по приведённым напряжениям 69%. По второму предельному состоянию прогибы стропила составляют 5,37 мм, что меньше допустимых 3000/150 = 20 мм.

Выводы

По техническому состоянию и конструктивному исполнению элементы покрытия на момент обследования имеют частичное работоспособное состояние. Требуется выполнить частичную замену кровельного покрытия с целью устранения дефектов, таких как частичное разрушение, загнивание, и т.п.

Список использованной литературы

1. Швец Г. А., Тугбаева Ю. В. Реконструкция многоэтажного производственного здания // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2019. № 4(138). С. 152-155.

2. Андриянов С. П. Ретроспективный анализ подходов к состоянию ограждающих конструкций для опасных производственных объектов // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16, № S4.

3. Shishov I., Lisyatnikov M., Lukin M., Deev V., Prusov E., Chibrikin D., Roshcina S. Application of variable-height beams with wooden sub-rafter elements in the roof structures of industrial buildings. E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 460. Article No. 10046.

4. Лукин М. В., Рощина С. И. Ремонтопригодность несущих деревянных конструкций // Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование: Сборник материалов Международной научно-практической конференции, Иваново, 21–24 марта 2024 года. Иваново: Ивановский государственный политехнический университет, 2024. С. 98-100.

5. Рощина С. И., Лукин М. В., Сергеев М. С., Лисятников М. С. Реконструкция жилого комплекса в Московской области // Актуальные вопросы развития строительной отрасли, экологической и промышленной безопасности: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Вологда, 17 ноября 2022 года. Вологда: Вологодский государственный университет, 2023. С. 192-195.

6. Булатова Р. К., Трофимов А. Ю. Реконструкция системы теплоснабжения производственного здания // Материалы 75-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных УГНТУ, Уфа, 17–18 апреля 2024 года. Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2024. С. 309.

УДК 69.059.2

ОПТИМИЗАЦИЯ СВАЙНОГО ОСНОВАНИЯ ЖИЛОГО КОМПЛЕКСА С ПОДЗЕМНОЙ АВТОСТОЯНКОЙ

Медведев Евгений Константинович*, ассистент кафедры строительных конструкций, **Гоньшаков Назар Геннадьевич**, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций, **Крячко Владислав Романович**, студент кафедры строительных конструкций

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), kp.ekm.13@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты оптимизации свайного основания здания жилого комплекса с подземной автостоянкой в г. Казань с

целью достижения минимальных технико-экономических показателей. Подробно описана конструктивная схема здания, включающая свайное поле, рассматриваемое в трёх вариантах. С использованием метода конечных элементов выполнен анализ предлагаемых вариантов свайного поля, устанавливающий возможность их применения с точки зрения нормативных требования и экономической составляющей. Проведены натурные испытания пробных свай для установления фактической несущей способности и осадок свай в реальных грунтовых условиях. На основе результатов натурных испытаний разработаны и проверены повторным расчётом оптимизированные варианты свайного поля с точки зрения из технико-экономической эффективности.
Ключевые слова: несущая способность, метод конечных элементов, железобетон, монолитный железобетон, сваи, буронабивные сваи.

OPTIMIZATION OF THE PILLAR FOUNDATION OF A RESIDENTIAL COMPLEX WITH AN UNDERGROUND CAR PARK

Evgeny Konstantinovich Medvedev*, Assistant Professor of the Department of Building Structures, **Nazar Gennadievich Gonshakov**, PhD, Associate Professor of the Department of Building Structures, **Kryachko Vladislav Romanovich**, Student, Department of Building Structures

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), kp.ekm.13@mail.ru

Abstract. The article presents the results of optimizing the pile foundation of a residential complex with an underground parking lot in Kazan in order to achieve minimum technical and economic indicators. The structural scheme of the building, including the pile field, is described in detail in three variants. Using the finite element method, the proposed variants of the pile field are analyzed to determine their feasibility in terms of regulatory requirements and economic considerations. Field tests of test piles were conducted to determine the actual bearing capacity and settlement of the piles in real soil conditions. Based on the results of the field tests, optimized options for the pile field were developed and verified by repeated calculations in terms of technical and economic efficiency.
Keywords: load-bearing capacity, finite element method, reinforced concrete, monolithic reinforced concrete, piles, and bored piles.

Введение

Здание жилого комплекса с подземной автостоянкой в г. Казань сложной формы, общими габаритами в плане 69×32 метра с максимальной высотой по парапету 63 метра. Конструктивная схема здания – каркасная, с внешними стенами по периметру, являющиеся ограждающими конструкциями подземного паркинга, внутренними стенами лестнично-лифтовых узлов, и

колоннами и пилонами внутри здания. Пространственная жёсткость и геометрическая неизменяемость каркаса здания обеспечивается жёсткими узлами сопряжения вертикальных и горизонтальных элементов между собой и жёстким сопряжением вертикальных элементов с фундаментной плитой здания.

Фундамент представляет собой сплошную монолитную железобетонную плиту на свайном основании. Свайное основание выполнено буронабивными сваями диаметром 800 мм и длиной 30 метров. В первом варианте так же присутствуют сваи сборные сечением 400×400 мм, длиной 12 метров.

Целью работы являлась оптимизация свайного поля с точки зрения сравнения технико-экономических показателей трёх вариантов на основании расчёта методом конечных элементов, уточнения расчёта жёсткостей свай специализированным программным комплексом и на основании проведённых статических испытаний свай на строительной площадке [1].

Три варианта свайного поля представлены на рис. 1-3.

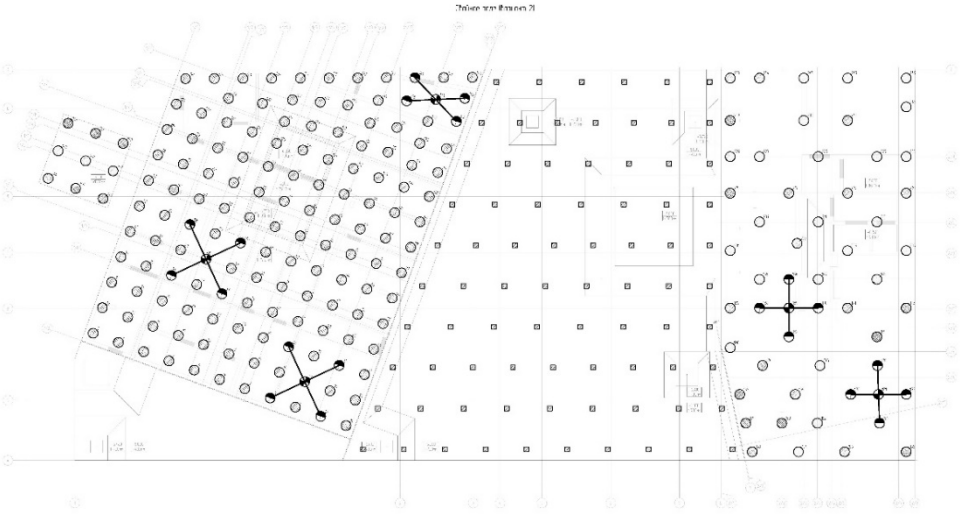


Рис. 1. Свайное поле. Вариант 1 – (БНС Ø800×30(L), 400×400×12(L))

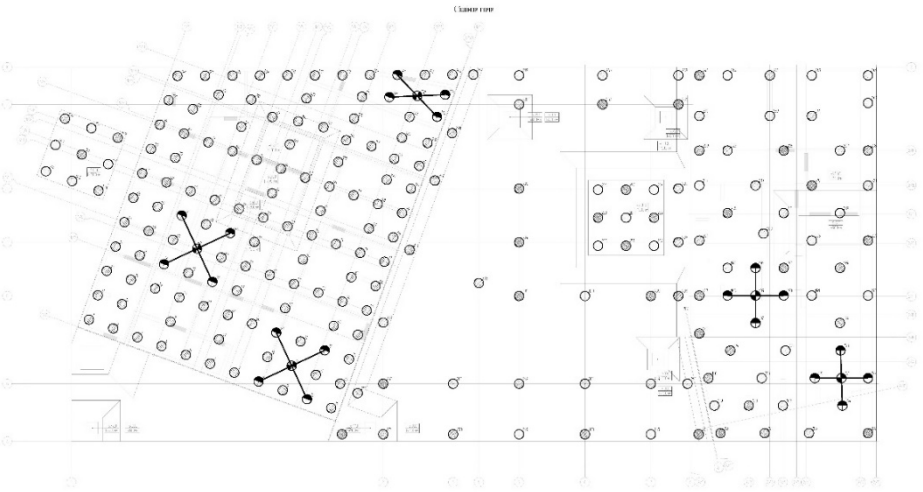


Рис. 2. Свайное поле. Вариант 2 – (БНС Ø800×30(L))

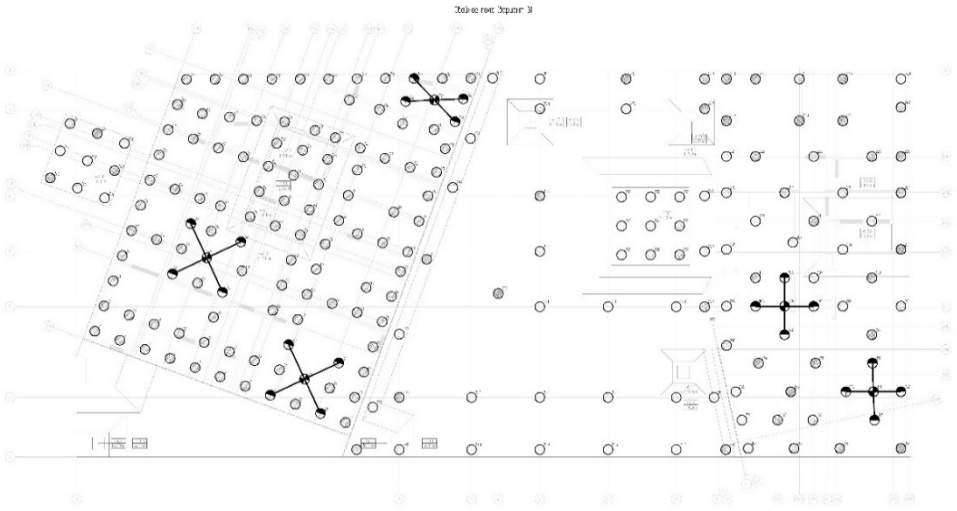


Рис. 3. Свайное поле. Вариант 3 – (БНС Ø800×30(L))

Методы

Существует единственный метод решения оценки технико-экономических показателей вариантов свайного основания. Метод содержит в себе несколько этапов:

1. Выполнялся расчёт конечно-элементной модели в программном комплексе ЛИРА для теоретической оценки жёсткости, величин нагрузок, несущей способности, осадок свай в составе свайного поля с учётом их взаимного влияния. Расчётная модель представляет собой полную модель каркаса здания, включающую фундаментные плиты, свайное поле и модель грунтового основания с фактическими физико-механическими характеристиками каждого инженерно-геологического элемента;
2. Выполнялись статические испытания пробных свай на строительной площадке для установления их фактической несущей способности и осадок;
3. Выполняется корректировка свайного поля на основе статических испытаний. Выполняется уточнение жёсткостей свай специализированным программным комплексом;
4. Выполняется повторный расчёт конечно-элементной модели каркаса здания с учётом выполненных статических испытаний, откорректированного свайного поля, уточнённых жёсткостей свай [2];
5. Выполняется оценка технико-экономических показателей каждого варианта свайного поля [3,4].

Пункт 4 представленных методов может выполнятся несколько раз в зависимости от разных факторов, в том числе от показателей, определяемых в пункте 5.

Результаты и обсуждение

Теоретическая оценка несущей способности свай всегда подтверждается результатами испытаний пробных свай. Цель проведения испытаний

преследует получение реальной несущей способности свай и, как следствие, рассмотреть возможность оптимизации свайного поля с точки зрения минимальных технико-экономических факторов, результатов численного расчёта, с соблюдением всех требований нормативных документов и достижения безопасной эксплуатации будущего здания.

Этап 1 выполняется в первую очередь для комплексной оценки предварительного свайного основания и на его основе определяется положение пробных свай, несущую способность и осадку которых необходимо уточнить путём проведения испытаний (этап 2).

Производится корректировка (этап 3) свайного поля на основании результатов пробных свай. Рассматриваются два свайного поля со взаимно отличающимся расположением свай. Корректировка свайного поля на основании статических испытаний, повторного конечно-элементного расчёта (этап 4) показывает удовлетворительные технико-экономические показатели (этап 5) первого и третьего вариантов свайного поля по сравнению со вторым (таблица 1).

Таблица 1. Технико-экономические показатели

Вари-ант	Сваи		Объём бетона	Расход металла	Цена		Стоимость		
	БНС Ø800мм	400×400 мм			B40, F150, W10	Ø25, A500C	Бетон	Арматура	ВСЕГО
	шт		м³	кг	руб/м³	руб/т	тыс. руб		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	206	79	1140.48	734119	9900	63800	11 291	46 837	58 128
2	230	-	1104	800860	9900	63800	10 930	51 095	62 025
3	221	-	1060.8	769522	9900	63800	10 502	49 096	59 598

Использованный метод решения поставленной задачи позволяет сделать вывод о том, что наиболее выгодным вариантом свайного поля является вариант 1 со сборными сваями по сравнению с двумя другими. Следует отметить, что в таблице технико-экономических показателей не учтена стоимость аренды сваебойной установки и дополнительная стоимость на заказ свай у завода. Учитывая эти факторы, можно сделать вывод о том, что первый вариант свайного поля с экономической точки зрения может выйти наиболее невыгодным по сравнению с третьим.

Выводы

Оптимизация позволила найти баланс между выполнением необходимых требований нормативных документов, конечно-элементного расчёта, требований проектирования представленных строительных конструкций, требованием современного рынка строительства с целью обеспечения безопасной эксплуатации здания и достижения снижения стоимости строительства.

С точки зрения расчётного обоснования, результатов испытания, технико-экономических показателей третий вариант свайного поля является наиболее экономически выгодным решением в сравнении с другими вариантами.

Список использованной литературы

1. Знаменский, В. В. Оптимизация параметров свайных фундаментов / В. В. Знаменский, А. М. Рузаев, А. Н. Власов // Геотехника. – 2010. – № 3. – С. 44-52. – EDN OWFTRH.

2. Моргун, А. С. Расчетное обоснование методом граничных элементов оптимального варианта свайного поля сооружения / А. С. Моргун, А. В. Ницевич, Ю. Ю. Шевчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 4(97). – С. 28-31. – EDN QAIBAJ.

3. Кульчицкий, Г. Б. Экспериментально-теоретическое развитие методов оптимального проектирования свайных фундаментов с учетом их надежности : специальность 05.23.02 "Основания и фундаменты, подземные сооружения": автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Кульчицкий Георгий Болеславович. – Пермь, 1994. – 57 с. – EDN ZKDLTL.

4. Андерсон М.С., Арман Ж.-Л., Арора Дж. С. Новые направления оптимизации в строительном проектировании. М.: Стройиздат, 1989. 587 с.

5. СП 50-102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов. Москва, 2004.

6. СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты. Москва, 2022.

УДК 692.522.8

НАПРЯЖЕНО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБЛЕГЧЕННОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ

Мясников Даниил Олегович*, ассистент, кафедры строительных конструкций, **Михно Кирилл Сергеевич**, магистрант кафедры строительные конструкции, **Ощепкова Екатерина Олеговна**, магистрант кафедры строительные конструкции

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), daniil.miasnikov.96@mail.ru

Аннотация. В статье представлено исследование напряжённо-деформированного состояния облегчённой железобетонной конструкции, разработанной на основе типовой решётчатой балки путём удаления «неработающего» бетона из растянутой зоны. Целью работы является создание методики расчёта усилий и перемещений, учитывающей геометрическую и физическую нелинейность, а также переменную жёсткость сечений. Рассмотрены изгибающие моменты, продольные и поперечные силы, прогибы с учётом деформированной схемы, а также напряжённое состояние опорного диска при предварительном обжатии. Расчёты, выполненные с использованием интегралов Мора, подтвердили достаточную жёсткость конструкции и возможность сокращения расхода бетона до 30% без потери несущей способности. Особое внимание уделено влиянию трещинообразования и арочного эффекта на поведение конструкции. Предложены рекомендации по оптимизации армирования и предварительного напряжения, обеспечивающие повышение экономической эффективности и надёжности. Результаты применимы для проектирования одноэтажных промышленных зданий, где снижение материалоёмкости особенно актуально. Перспективы исследования включают экспериментальную проверку и разработку программного обеспечения для автоматизации расчётов.
Ключевые слова: железобетонная конструкция, облегчённая балка, напряжённо-деформированное состояние, предварительное обжатие, нелинейный анализ, трещинообразование, материалоёмкость.

STRESS-STRAIN STATE OF A LIGHTWEIGHT REINFORCED CONCRETE BEAM

Daniil Olegovich1 Myasnikov*, Assistant, Department of Building Structures, **Mikhno Kirill Sergeevich**, master's student of the department of building constructions, **Oshchepkova Ekaterina Olegovna**, master's student of the department of building constructions

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs,
(Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation),
daniil.miasnikov.96@mail.ru

Abstract. This article presents a study of the stress-strain state of a lightweight reinforced concrete structure, developed by removing “non-working” concrete from the tension zone of a standard lattice beam. The objective is to devise a methodology for calculating forces and displacements, accounting for geometric and physical nonlinearity, as well as variable cross-sectional stiffness. The analysis includes bending moments, longitudinal and transverse forces, deflections based on the deformed scheme, and the stress state of the support disk under pre-compression. Calculations using Mohr’s integrals confirmed the structure’s sufficient rigidity and the potential to reduce concrete usage by up to 30% without compromising load-bearing capacity. Special attention is given to the effects of crack formation and the arch effect on the structure’s behavior. Recommendations are proposed for optimizing reinforcement and pre-stressing to enhance economic efficiency and reliability. The results are applicable to the design of single-story industrial buildings where material efficiency is critical. Future research directions include experimental validation and the development of software for automated calculations.
Keywords: reinforced concrete structure, lightweight beam, stress-strain state, pre-compression, nonlinear analysis, crack formation, material efficiency.

Введение

Современные строительные технологии ориентированы на снижение материалоёмкости при сохранении прочностных характеристик [1]. Железобетонные конструкции, сочетающие прочность бетона и арматуры, служат основой для инновационных решений в строительстве [2]. В данной работе исследуется облегчённая железобетонная конструкция, разработанная на основе решётчатой балки путём удаления «неработающего» бетона из растянутой зоны, что позволяет снизить расход материала до 30% [3].

Цель исследования – разработка теоретической модели для оценки усилий и перемещений с учётом геометрической и физической нелинейности. Научная новизна заключается в создании методики расчёта, учитывающей переменную жёсткость сечений, влияние трещинообразования и особенности напряжённого состояния опорных узлов при предварительном обжатии.

Методика расчёта

Для анализа напряжённо-деформированного состояния определены параметры: пролёт l = 12 м; ширина сечения b = 0,2–0,24 м; высота сечения hx (переменная); площадь арматуры затяжки Az; модули упругости Eb = 30600–35200 МПа (бетон), Ez = 190000–200000 МПа (арматура); нагрузка q = 28,88 кН/м. Геометрические характеристики сечений (табл. 1) описывают изменение жёсткости вдоль пролёта, как показано на схеме (Рис. 1).

Таблица 1. Геометрические характеристики сечений

Искомые величины	Сечения				
	0	1	2	3	4
$x_i = c + (i\text{-}1)\cdot(0{,}5l\text{-}c)/3$ (м)	0	1,35	2,85	4,35	5,85
$H_x = H_0 + x\cdot\mathrm{tg}\alpha$ (м)	0,9	1,013	1,139	1,265	1,39
h_x (м)	0,9	0,632	0,36	0,36	0,39
$A_x = b \cdot h_x$ (м^2)	0,18	0,1264	0,072	0,072	0,078
$S_x = b \cdot h^2_x/2$ (м^3)	0,081	0,0399	0,01296	0,01296	0,01521
$z_x = h_x/2$ (м)	0,45	0,316	0,18	0,18	0,195
$y_x = H_x - a_з - h_x + z_x$ (м)	0,39	0,637	0,899	1,025	1,135

Усилия рассчитаны с учётом статической неопределимости. Изгибающий момент Mx, продольная Nx и поперечная Qx силы определяются по формулам (1), (2), (3):

$$Mx = \frac{q(l-2x)}{2} - H \cdot yx \quad (1)$$

$$Nx = \frac{q(l-2x)}{2} \cdot \sin\alpha - H \cdot \cos\alpha \quad (2)$$

$$Qx = \frac{q(l-2x)}{2} \cdot \cos\alpha - H \cdot \sin\alpha \quad (3)$$

где H – усилие в затяжке, $\alpha = \arctan[4(H_0 - H\{0.5l\})/(0.5l)]$. Результаты расчётов усилий приведены в (табл. 2).

Таблица 2. Расчётные значения усилий в сечениях

Искомые величины	Сечения				
	0	1	2	3	4
x (м)	0	1,35	2,85	4,35	5,85
H_x (м)	0,9	1,013	1,139	1,265	1,39
y_x (м)	0,39	0,637	0,899	1,025	1,135
$M_{бх}$ (кН ·м)	0	165,78	299,26	379,35	406,05
$H_з \cdot y_x$ (кН ·м)	0	207,47	292,80	333,84	369,67
$M_x = M_{бх} - H_з \cdot y_x$ (кН ·м)	0	-41,69	6,46	45,51	36,38
$Q_{бх}$ (кН)	138,82	106,79	71,19	35,60	0
$Q_x = Q_{бх}\cdot\cos\alpha - H_з\cdot\sin\alpha$ (кН)	111,15	79,23	43,76	8,29	-27,19
$N_x = Q_x\cdot\sin\alpha + H_з\cdot\cos\alpha$ (кН)	333,84	331,18	328,22	325,26	322,29

Результаты и обсуждение

Прогиб в середине пролёта f = 0,04 м рассчитан с использованием интегралов Мора, что подтверждает жёсткость конструкции [4]. Геометрическая нелинейность учтена коэффициентом γ = 1,2. Напряжения в опорном диске при предварительном обжатии рассчитаны по гипотезе плоских сечений, касательные напряжения признаны незначительными [5].

На основе исследований предложены рекомендации: предварительное напряжение арматуры σ{sp} = 0,61…0,73·R{s,ser}, поперечное армирование стержнями Ø12 мм класса А400 с шагом 150 мм, симметричное армирование стержнями 2Ø32 мм класса А400.

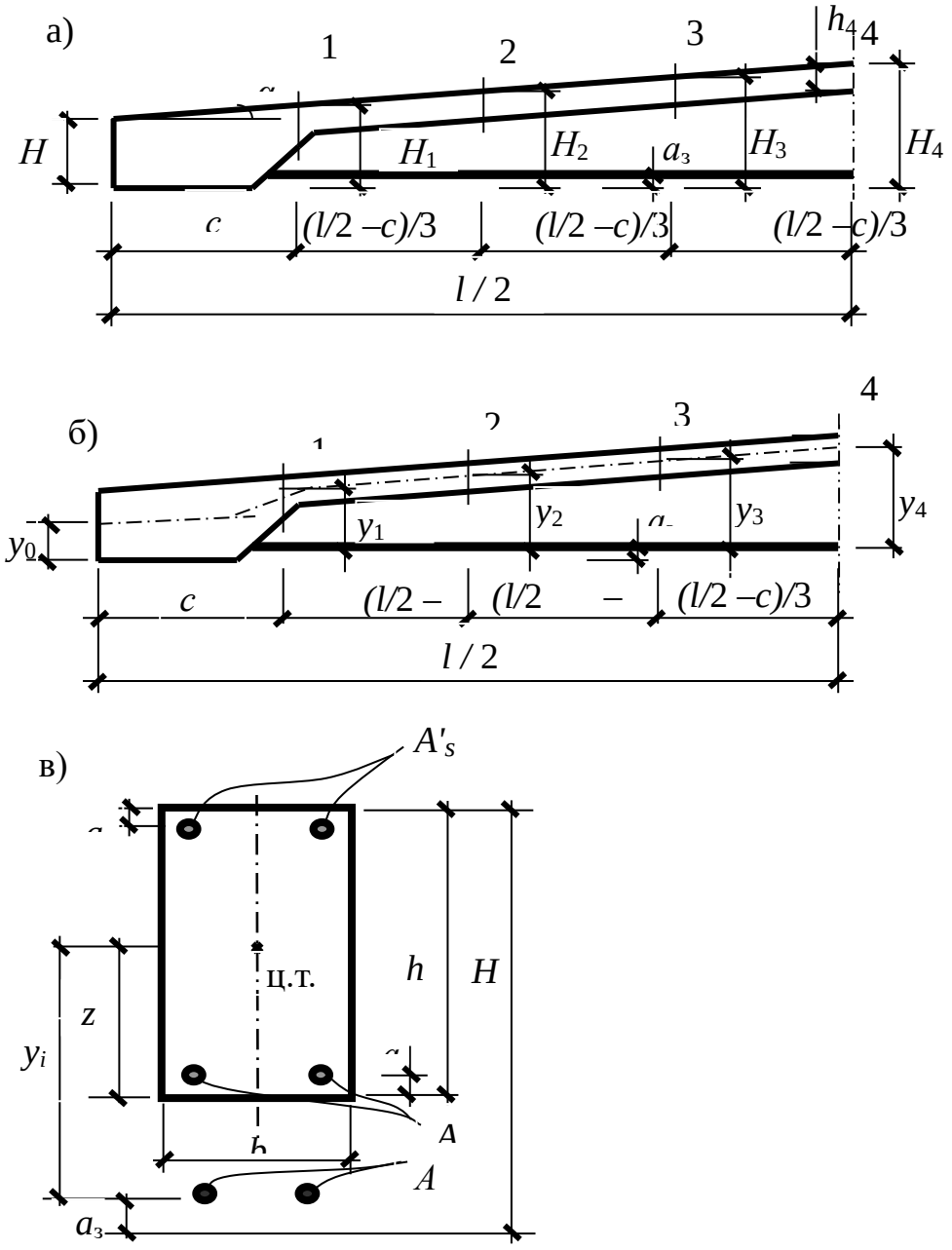


Рис. 1. Геометрическая схема облегчённой конструкции и расчётные сечения

Выводы

Разработанная методика расчёта напряжённо-деформированного состояния облегчённой железобетонной конструкции представляет собой значительный шаг в совершенствовании проектирования строительных элементов с учётом геометрической и физической нелинейности. Проведённые расчёты подтвердили возможность сокращения расхода бетона на 30% за счёт удаления «неработающего» материала из растянутой зоны, что сохраняет несущую способность и жёсткость конструкции. Прогиб в середине пролёта, составивший 0,04 м, свидетельствует о достаточной жёсткости конструкции, а учёт трещинообразования и переменной жёсткости сечений повышает точность прогнозов её поведения под нагрузкой [6].

Предложенные рекомендации по армированию и предварительному обжатию обеспечивают оптимальное распределение усилий, минимизируя риск разрушения и повышая долговечность конструкции. Экономическая эффективность разработанного решения делает его перспективным для применения в одноэтажных промышленных зданиях, где снижение материалоёмкости особенно актуально. Кроме того, методика позволяет учитывать сложные эффекты, такие как арочный эффект и перераспределение усилий в статически неопределённых системах, что расширяет её применимость к другим типам железобетонных конструкций [7].

Вместе с тем, исследование выявило необходимость дальнейшего изучения долговременного поведения облегчённых конструкций, включая влияние ползучести бетона, усталостных процессов и возможных изменений эксплуатационных нагрузок. Перспективным направлением является также экспериментальная проверка теоретических выводов на физических моделях, чтобы подтвердить надёжность предложенных решений в реальных строительных условиях. Разработка программного обеспечения для автоматизации расчётов с учётом нелинейных факторов могла бы дополнительно упростить внедрение методика в практику проектирования. Таким образом, данное исследование вносит вклад в развитие ресурсосберегающих технологий в строительстве и открывает новые возможности для оптимизации железобетонных конструкций.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, госзадание ВлГУ).

Список литературы

1. Залесов А.С., Кодыш Э.Н. Расчёт железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям // Стройиздат. 1988. С. 1–200.
2. Жуковский Э.З., Дыховичный Ю.А. Современные пространственные конструкции // Высшая школа. 1991. С. 1–150.

3. Назаренко П.П. Совершенствование расчёта трещиностойкости опорных участков железобетонных конструкций // Новосибирск. 1984. С. 1–100.

4. Гвоздев А.А. О перераспределении усилий в статически неопределимых железобетонных конструкциях // Госстройиздат. 1955. С. 1–80.

5. Бартенев В.С. Железобетонные облегчённые конструкции // Владимир. 1998. С. 1–120.

6. Мясников Д.О. Этапы блочно-модульного проектирования объектов // Строительство. Архитектура. Дизайн: Материалы Пятой Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных, Курск, 25 апреля 2024 года. Курск: ЗАО Университетская книга, 2024. С. 140–143.

7. Мясников Д.О., Рощина С.И., Лукин М.В. Облегчённые ребристые плиты перекрытий вспарушенного типа // Сборник трудов V Международной научно-технической конференции (MPCPE-2024), Владимир, 23–25 апреля 2024 года. Владимир: АРКАИМ, 2024. С. 131–135.

УДК 531

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МАССИВНЫХ ОБРАЗЦОВ БЕТОНА

Овчаренко Валерия Алексеевна [1], аспирант, **Петров Павел Олегович** [1], аспирант, **Жуков Илья Александрович** [1], д.т.н., доцент, зав. лаб. нанотехнологий металлургии, **Гаркушин Геннадий Валерьевич** [2], к.ф.-м.н., с.н.с лаборатории реологических свойств конденсированных сред при импульсных воздействиях, **Савиных Андрей Сергеевич** [2], к.ф.-м.н., с.н.с лаборатории реологических свойств конденсированных сред при импульсных воздействиях, **Разоренов Сергей Владимирович** [2], д.ф.-м.н., профессор, зав. лаб. реологических свойств конденсированных сред при импульсных воздействиях

[1] Национальный исследовательский Томский государственный университет (г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050, Российская Федерация), vygornova@gmail.com

[2] ФИЦ Проблем химической физики и медицинской химии РАН (г. Черноголовка, пр. Академика Семенова, 1, 142432, Российская Федерация), garkushin@ficp.ac.ru

Аннотация. В ходе исследования были выполнены испытания массивного цилиндрического образца толщиной 500 мм из тяжелого бетона при ударно-

волновом нагружении. Основные результаты работы заключались в получении профиля скорости свободной поверхности, на основе которого определены предварительные значения динамической прочности материала на растяжение. Проведена визуальная оценка характера разрушения сохранившихся фрагментов разрушенного образца. Установлено, что при выбранном методе нагружения в материале массивного образца одновременно формируются две области разрушения, характеризующиеся процессами сжатия и растяжения. Полученные результаты позволяют лучше понять механизмы разрушения бетона при динамических нагрузках и могут быть использованы для более точного прогнозирования поведения бетонных конструкций при экстремальных воздействиях. Даны рекомендации для определения динамической прочности исследуемого бетона на образцах меньших длин.
Ключевые слова: тяжелый бетон; ударно-волновое воздействие; сжатие; прочность

INVESTIGATION OF DYNAMIC STRENGTH OF MASSIVE CONCRETE SPECIMENS

Ovcharenko Valeria [1], undergraduate student, **Petrov Pavel** [1], undergraduate student, **Zhukov Ilya** [1], D.Sc., доцент, Head of laboratory of nanotechnology in metallurgy, **Garkushin Gennady** [2], Candidate of Science, Senior Researcher of laboratory of rheological properties of condensed media upon impulse impacts, **Savinykh Andrey** [2], Candidate of Science, Senior Researcher of laboratory of rheological properties of condensed media upon impulse impacts, **Razorenov Sergey** [2], D.Sc., Prof., Head of laboratory of rheological properties of condensed media upon impulse impacts

[1] National Research Tomsk State University (Tomsk, Lenin ave., 36, 634050, Russian Federation), vygornova@gmail.com
[2] Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS (Chernogolovka, Ac. Semenov ave., 1, 142432, Russian Federation), garkushin@ficp.ac.ru

Abstract. The study involved testing a 500 mm thick massive cylindrical specimen made of heavy concrete under shock-wave loading. The main results of the work included obtaining a free surface velocity profile, which was used to determine preliminary values of the dynamic tensile strength of the material. A visual assessment of the fracture pattern of the remaining fragments of the destroyed specimen was performed. It was found that with the selected loading method, two fracture zones characterized by compression and tension processes are simultaneously formed in the material of the massive specimen. The results obtained provide a better understanding of the mechanisms of concrete fracture under dynamic loads and can be used to more accurately predict the behavior of concrete

structures under extreme impacts. Recommendations are given for determining the dynamic strength of the concrete under study on shorter specimens.
Keywords: heavy concrete; shock wave loading; compression; strength

Введение

В современных реалиях особое внимание уделяется повышению защитных свойств конструкций и помещений объектов транспорта, энергетики и машиностроения. Это обусловлено необходимостью обеспечения надежной работы при повышении производительности ответственных агрегатов и механизмов в условиях повышенных нагрузок. Высокопрочный тяжелый бетон в этом случае выступает основным материалом для создания несущих и защитных сооружений [1]. При проектировании ответственных объектов критически важно иметь полную информацию о свойствах выбранной марки бетона, чтобы корректно оценить его надежность, долговечность и способность выдерживать экстремальные нагрузки, обычно превышающие эксплуатационные. Здесь особую опасность представляют динамические или импульсные нагрузки, которые характеризуются внезапным выбросом большого количества энергии за короткий промежуток времени. Источником таких нагрузок могут быть природные явления, техногенные аварии, террористические акты. Отмечено, что при динамических воздействиях материалы проявляют скоростную чувствительность, демонстрируя поведение, отличное от квазистатических условий [2,3,4]. Изучение подобного поведения особенно актуально для конструкционных бетонов различных марок. В настоящее время существенным ограничением при проектировании является отсутствие единой базы механических свойств различных марок бетона, вмещающей их прочность при разных скоростях деформации [5], что затрудняет точный прогноз защитных характеристик конструкций при возможных динамических воздействиях. Для обеспечения надежной защиты критически важно развивать методы исследования и моделирования поведения бетонных составов при различных видах нагрузок, особенно при экстремальных динамических воздействиях [6,7,8].

Целью данного исследования явилась необходимость описания деформационного поведения тяжелого бетона при ударно-волновых воздействиях.

Для достижения поставленной цели необходимо провести ряд работ включающих изготовление образцов из тяжелого бетона, апробировать методику проведения экспериментальных работ на массивных образцах, провести анализ полученных результатов – дать качественные и количественные оценки.

Методы

Эксперименты по ударно-волновому нагружению массивного образца тяжелого бетона были проведены с использованием оригинального

оборудования лаборатории реологических свойств конденсированных сред при импульсных воздействиях ФИЦ ПХФ и МХ РАН, г. Черноголовка [9]. В основу источника ударных волн входил генераторатор плоских ударных волн, в качестве регистрирующего устройства – лазерный Допплеровский интерферометрический измеритель скорости свободной поверхности VISAR [10]. В созданных условиях исходная волна нагружения выдавала давление ударного сжатия на входе в цилиндрический образец равное 3,8 ГПа длительностью до 10 мкс.

Образцы тяжелого бетона марки М600 в виде цилиндров радиусом 55 мм и длиной 500 мм были изготовлены в заводской лаборатории путем приготовления замеса согласно ГОСТ 27006-2019, заливки в пластиковые формы, легкого вибрирования и выдержки до полного набора прочности в течение 28 суток. После чего, тыльные поверхности образцов торцевались алмазным диском и шлифовались до необходимой гладкости для плотного прилегания к генератору ударных волн и регистрирующей пластине с выдержкой плоскопараллельности для исключения возможных искажений ударной волны. Размеры массивных образцов бетона были выбраны исходя из представительности исследуемых объемов [8], содержащих крупные включения гравия.

Результаты и обсуждение

В результате проведенного эксперимента по ударно-волновому деформированию массивного образца бетона длиной 500 мм получена диаграмма изменения скорости свободной поверхности для оценки количественных характеристик динамической прочности и сохранены ключевые фрагменты разрушенного цилиндрического образца для визуального анализа особенностей разрушения.

Сохранившийся образец после ударно-волнового нагружения состоял из нескольких фрагментов, которые удалось идентифицировать во взрывной камере после эксперимента. Специальная разметка, предварительно нанесенная на поверхность образца перед испытанием, позволила расположить разрушенные фрагменты в требуемом порядке для проведения визуального анализа кинетики протекания процесса разрушения. По первоначальному виду поверхностей разрушения и форме фрагментов определено, что сохранившиеся блоки не имеют остаточных следов пластической деформации. Визуальный анализ показал, что на всей длине имеет место два вида разрушения, вызванные растяжением и сжатием.

Фрагменты образца, близкие к свободной поверхности имеют трещины в поперечном главной оси направлении – это трещины отрыва, образованные в результате откольных явлений в месте, где отраженная от свободной поверхности упругая волна взаимодействует с волной разрежения. Измеренная длина откольного фрагмента равна ~70 мм. Разрушение сжатием произошло в области, примыкающей к генератору ударных волн. Эта область характеризуется конусом, направленным навстречу направлению

распространения ударной волны, по форме напоминающим разрушение образца при квазистатическом одноосном сжатии. Множественные мелкие осколки материла из области до ~100 мм и вокруг конуса сохранить не удалось. Основание конуса можно считать окончанием зоны разрушения сжатием, общая длина от исходного места нахождения торца цилиндра до основания конуса была равна ~200 мм. В результате визуального осмотра и анализа разрушения было решено определять максимальное напряжение сжатия, которое, по сути, является динамическим пределом прочности бетона на сжатие, проведением дополнительных экспериментов по ударно-волновому нагружению на серии образцов меньшей длины – до 200 мм.

Используя полученный профиль свободной поверхности, можно провести теоретические оценки прочности на растяжение и аналитически оценить длину откольной пластины [11]. Измерив разницу между максимальным и минимальным значением скорости свободной поверхности в волне разгрузки, найдено значение прочности на растяжение, которое было равно 36 МПа, а скорость деформации, предшествующая явлению откола равна 75 $с^{-1}$. Теоретическая толщина откольного фрагмента была равна 64 мм, что практически совпало с измеренными ранее значениями сохраненных фрагментов.

Выводы

Проведенный эксперимент по ударно-волновому деформированию массивных образцов тяжелого бетона является началом цикла экспериментальных работ по исследованию динамической прочности. Было необходимо выяснить кинетику протекания разрушения исследуемого материала и определить возможность нахождения характеристик динамической прочности.

В результате чего получен профиль скорости свободной поверхности цилиндрического образца из бетона М600 длиной 500 мм при воздействии импульса ударной нагрузки длительностью в десятки микросекунд. Из анализа профиля свободной поверхности определено, что динамическая прочность на растяжение составила 36 МПа при скорости деформации 75 $с^{-1}$.

Из качественной оценки сохраненных фрагментов разрушенного образца решено, что динамическую прочность на сжатие следует проводить в серии испытаний с похожими условиями нагружения, но на коротких образцах длиной меньше 200 мм, чтобы исключить влияние откольного эффекта на результат.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00750, https://rscf.ru/project/25-29-00750/

Список использованной литературы

1. Волкова Д. С., Мищенко Д. С. Тяжелый бетон //Инновационные методы проектирования строительных конструкций зданий и сооружений. 2022. С. 129-131.

2. Брагов А.М., Игумнов Л.А., Ломунов А.К. Высокоскоростная деформация мелкозернистого бетона и фибробетона. 2015. Изд-во Нижегородского университета. Нижний Новгород. 269 с.

3. Скрипняк В.А., Скрипняк Е.Г., Козулин А.А., Пасько Е.Г., Скрипняк В.В., Коробенков М.В. Влияние поровой структуры хрупкой керамики на разрушение при динамическом нагружении // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 315. № 2. С. 113-117.

4. Разоренов С.В., Красновейкин В.А., Козулин А.А., Скрипняк В.А., Гаркушин Г.В Влияние структурных факторов на механические характеристики магниевого сплава Ма2-1 при квазистатическом и высокоскоростном деформировании // Физика твердого тела. 2015. Т. 57. № 2. С. 321-327.

5. Bragov A.M., Lomunov A.K., Gonov M.E., Konstantinov A.Yu., Igumnov L.A., Eremeyev V.A. Identification of dynamic behavior models of concrete B22.5 // Materials. 2023. Т. 16. № 6. С. 2259.

6. Karakulov V.V., Smolin I.Y., Kulkov S.N. Numerical simulation of mechanical behaviour of concrete under shock wave loading // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. 3. Сер. "3rd Internatiomal Conference on Rheology and Modeling of Materials, IC-RMM 2017" 2018. С. 012018.

7. Ламзин Д.А., Гонов М.Е., Брагов А.М., Ломунов А.К. Поведение мелкозернистых фибробетонов при разных режимах механического нагружения // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 81. С. 97-109.

8. Savinykh A.S., Garkushin G.V., Razorenov S.V., Kanel G.I. Method of measurement of the dynamic strength of concrete under explosive loading // International Journal of Fracture. 2018. Т. 209. № 1-2. С. 109-115.

9. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. 1996. Москва, изд-во "Янус-К". 407 с.

10. Barker L. M., Hollenbach R. E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface // J. Appl. Phys. 1972. 43. 4669.

11. Antoun T., Seaman L., Curran D.R., Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V. Spall fracture. Springer, NewYork. 2003. P. 404. DOI:10.1007/b97226.

УДК 69.059.643:658.567.1: 691.32

МОДИФИКАЦИЯ БЕТОННОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ И РЕЦИКЛИНГОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ

Павлова Инесса Павловна [1], к.т.н., доцент, декан архитектурно-строительного факультета, **Лизогуб Александр Александрович** [2], младший научный сотрудник ОЛ «НИЦИС», **Лизогуб Ирина Владимировна** [3], старший преподаватель кафедры технологии строительного производства

Брестский государственный технический университет (г. Брест, ул. Московская, д. 267, 224017, Республика Беларусь), [1] pavlinna@tut.by [2] p_332_14lizogub@mail.ru [3] lutaja-95@mail.ru

Аннотация. В данной статье представлены результаты экспериментального исследования применения вторичного заполнителя в составе бетонных композитов. Проведён рассев бетонного боя с последующим построением гранулометрических кривых. Исследованы два варианта смесей: с полной заменой природного заполнителя на рециклинговый (серия РБО1), а также с заменой только крупного заполнителя (серия РБО2). Установлено, что при использовании только рециклингового заполнителя наблюдается снижение удобоукладываемости смеси, что требует предварительного насыщения его водой. При этом прочностные характеристики бетона со вторичным заполнителем сопоставимы с бетоном на традиционном заполнителе. В рамках работы проведён анализ методов модификации бетонного композита на основе минеральных вяжущих и рециклингового заполнителя и предложены направления повышения физико-механических характеристик, включая применение косвенного армирования (серия РБК).
Ключевые слова: Рециклинг, рециклинговый бетон, бетонный бой, вторичный щебень

MODIFICATION OF CONCRETE COMPOSITE BASED ON MINERAL BINDERS AND RECYCLING AGGREGATE

Pavlova Inessa Pavlovna [1], Ph.D., Associate Professor, Dean of the Faculty of Architecture and Civil Engineering, **Lizahub Aliaksandr Aliaksandravich** [2], junior research fellow of BL «RCIC», **Lizahub Irina Vladimirovna** [3], senior lecturer, Department of Construction Technology

Brest State Technical University, (Brest, 267, Moskovskaya St., 224017, Republic of Belarus), [1] pavlinna@tut.by [2] p_332_14lizogub@mail.ru [3] lutaja-95@mail.ru

Abstract. This article presents the results of an experimental study on the use of recycled aggregate in concrete composites. A sieve analysis of crushed concrete waste was carried out, followed by the construction of particle size distribution curves. Two mixture variants were investigated: one with complete replacement of natural aggregate by recycled aggregate (series RCO1), and another with replacement of only the coarse aggregate (series RCO2). It was found that the use of solely recycled aggregate leads to reduced workability of the mixture, requiring pre-saturation of the aggregate with water. At the same time, the strength characteristics of concrete with recycled aggregate were comparable to those of concrete with traditional aggregate. The study also included an analysis of modification methods for mineral binder-based concrete composites using recycled aggregate, and proposed strategies for improving their physical and mechanical properties, including the use of indirect reinforcement (series RCI).
Keywords: Recycling, recycled concrete, concrete waste, secondary crushed stone.

Введение

Отходы являются неотъемлемой частью хозяйственной и производственной деятельности. В настоящий момент в Республике Беларусь политика обращения с отходами направлена на предотвращение, уменьшение объемов образования отходов и максимальное их использование. По данным Белстата [1], строительство находится в числе наиболее загрязняющих отраслей страны, а количество образующихся отходов в последние годы увеличилось (рисунок 1).

Рост объемов сноса старых зданий и сооружений создает предпосылки и для развития такого перспективного направления бизнеса, как переработка строительных отходов для их вторичного использования – рециклинг. Именно при сносе зданий и сооружений образуются наибольшие объемы строительных отходов.

К тому же в одном отвале перемешиваются совершенно разные материалы, и их сочетание может нанести непоправимый урон экологии. Это осколки бетона, смешанные с пропитанным битумом рубероидом, линолеумом на фенольных основах, трехслойными панелями с минеральной ватой, панелями из ДСП и асбоцемента, битым стеклом и многим другим. В настоящее время направление рециклинга железобетонных изделий в Беларуси активно развивается.

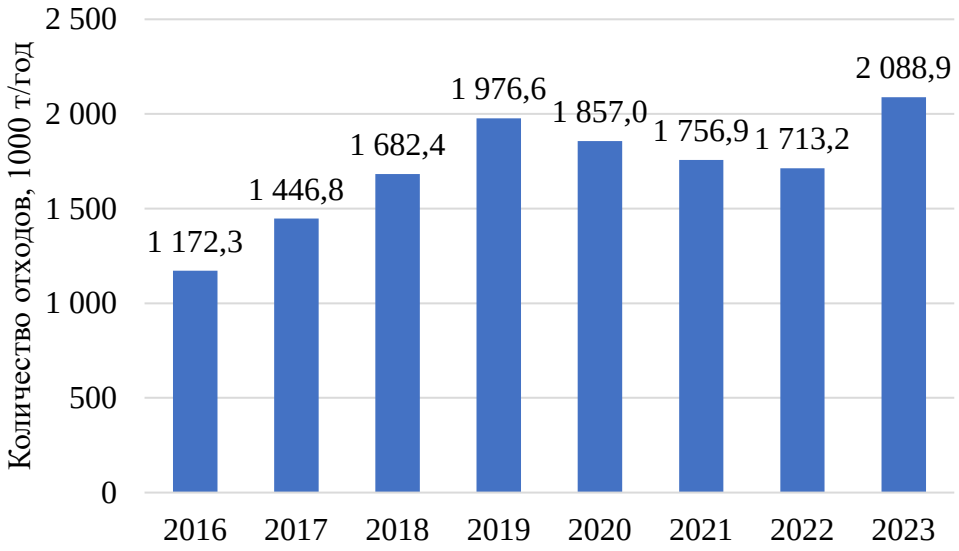


Рис. 1. Образование отходов строительства в Республике Беларусь

Из остатков кирпичных и железобетонных конструкций получают вторичный щебень различных фракций. Однако, применение такого заполнителя носит ограниченный характер из-за ряда специфических свойств, которыми обладает сам заполнитель и как итог – бетоны на его основе. Этот материал сегодня ограниченно применяется в строительстве зданий, дорог невысоких категорий, создании инженерной инфраструктуры, работах по благоустройству территорий, возведению гидрозащитных дамб, в редких случаях – при производстве бетона, сооружении и ремонте железнодорожных путей.

Одной из основных задач направления рециклинга железобетонных отходов является улучшение качества вторичного щебня. Добиться требуемых характеристик получаемых на основе вторичного заполнителя бетонов возможно путем внедрения рациональных схем переработки, новых поколений оборудования и добавок. В результате чего вторичному щебню может быть обеспечена конкурентоспособность с природными материалами.

Все это позволит обеспечить высокие показатели эксплуатационной надежности бетона, позволяющие, как следствие, снизить материалоемкость, уменьшить энерго- и трудозатраты, значительно увеличить долговечность, а также сроки межремонтной эксплуатации и снизить эксплуатационные расходы, связанных с функционированием различного рода конструктивных элементов, в том числе покрытий полов и дорог, железобетонных изделий заводского изготовления, а также с проведением ремонтных работ.

Для оценки возможности использования вторичного заполнителя был выполнен ряд экспериментальных исследований.

Методы и материалы

Как и в случае с природными материалами, оценка физических и механических свойств переработанного заполнителя имеет решающее значение для оценки его пригодности для использования в бетоне.

Для вторичного заполнителя характерно наличие старого цементного теста, прилипшего к контактной поверхности, имеющего менее плотную структуру, в результате чего снижается удельный вес, что было установлено в многочисленных исследованиях [2-4]. Приклеенная растворная часть рециклингового заполнителя имеет небольшой вес по сравнению с природным заполнителем того же объема, что обуславливает снижение общей плотности рециклингового заполнителя. Кроме того, многочисленные исследования также показали, что рециклинговый заполнитель обладает более высокой абсорбционной способностью, чем природные заполнители. Эти характеристики показывают долю рециклингового заполнителя, которую следует использовать в бетонных смесях [5], [6].

Различия в характеристиках поверхности между природными и рециклинговыми заполнителями приводят к более высокому водопоглощению переработанных заполнителей по сравнению с натуральными заполнителями, что делает переработанные заполнители более склонными к поглощению и удержанию влаги. Это может привести к снижению удобоукладываемости бетона и увеличению водоцементного отношения. С.К. Коу [7] экспериментально установил, что водопоглощение переработанных заполнителей разного размера частиц выше, чем у речного песка. Кроме того, чем меньше размер частиц переработанных заполнителей, тем выше водопоглощение.

Таким образом, характеристика свойств переработанных заполнителей направлена на оценку и понимание их влияния на удобоукладываемость, прочность бетона, удельный вес заполнителя и водопоглощение. Определение точных сведений об используемых материалах – залог правильного подбора состава бетонной смеси.

В работе использовались стандартизированные методики определения плотности, водопоглощения, гранулометрического состава.

На рисунке 2 представлены полученные экспериментально кривые рассева рециклингового заполнителя.

В работе предложено исключить из просеянного рециклингового заполнителя мелкие (<0,32 мм) и крупные фракции (>40мм). Полученная при этом кривая рассева попадает в область оптимального и допустимого зернового состава, что позволяет использовать его в качестве заполнителя для приготовления бетонной смеси.

Для экспериментальных исследований характеристик каждого состава были изготовлены серии образцов. Характеристики номинальных составов приведены в таблице 1.

В рециклинговом бетоне обычно содержится качественные заполнители и песок, поскольку использование сырьевых материалов определено подбором номинального состава бетона. Однако извлечение «чистых» заполнителей из разрушенного бетона при традиционной переработке обходится дорого и технически ограничено. Следовательно, рециклинговые заполнители всегда содержат прилипшее цементное тесто или частицы, похожие на многофазный раствор. Поэтому для получения удовлетворительной удобоукладываемости бетонной смеси производилось предварительное насыщение заполнителя водой.

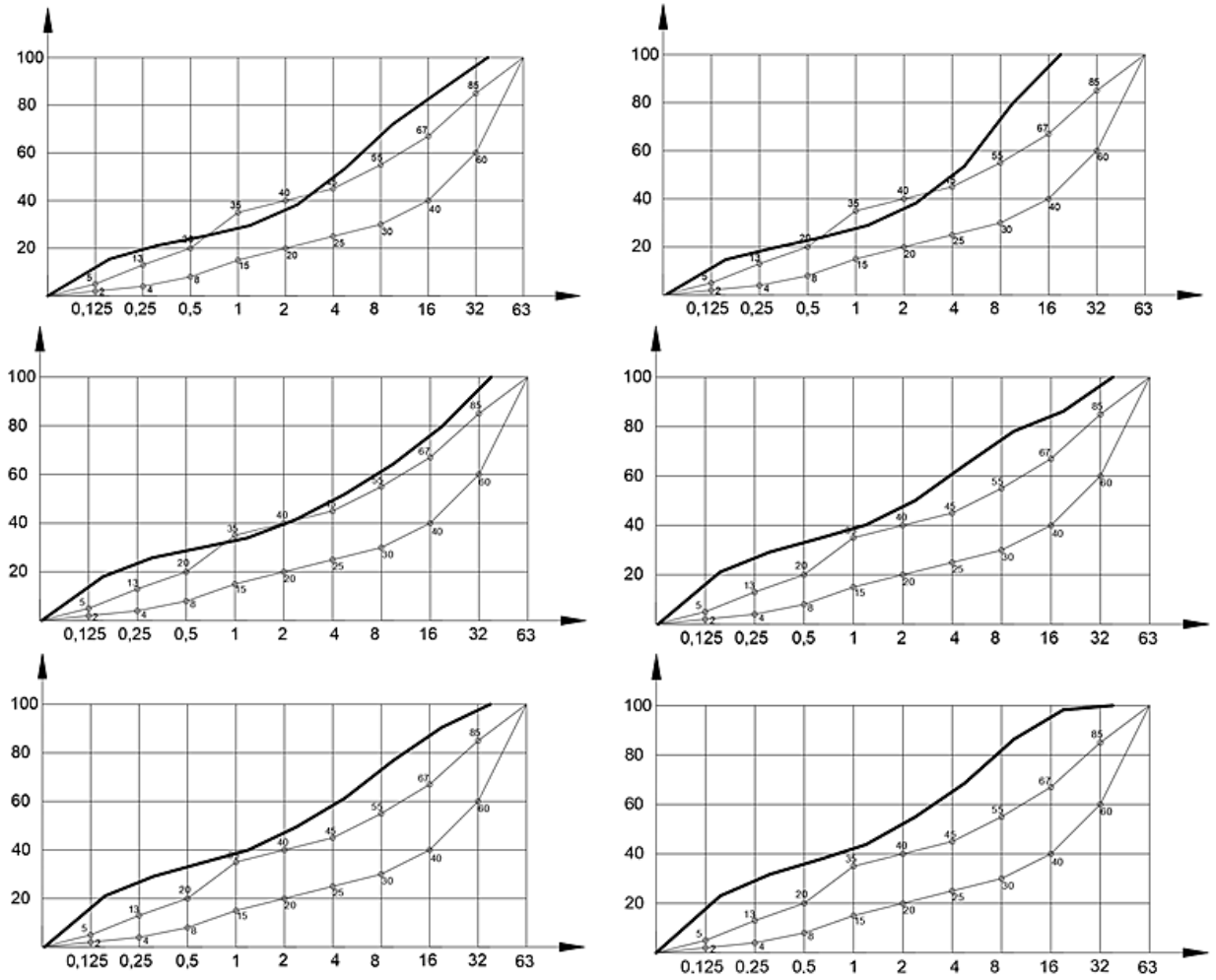


Рис. 2. Кривые рассева рециклингового заполнителя

Таблица 1. Составы бетона на рециклинговом заполнителе

Шифр состава	Расход материалов на 1 м^3 бетонной смеси					В/Вяж
	Заполнители, кг		Вяжущее, кг	Вода, л	Пластификатор, кг	
	Песок	Щебень				
РБО1	870*	1050*	360	151	4.3	0.42
РБО2	870	1050*	360	151	4.3	0.42
РБК	870	1050*	360	151	4.3	0.42

Примечание:
* – рециклинговые заполнители;
РБО – бетон на рециклинговом заполнителе обычный (без косвенного армирования);
РБК – бетон на рециклинговом заполнителе с косвенным армированием.

Результаты и обсуждение

1. Результаты испытания образцов серии РБО

Результаты испытания образцов серии РБО1 (с заполнителем, полностью состоящим из рециклинга) и образцов серии РБО2 (с крупным заполнителем, состоящим из рециклинга) на осевое сжатие в жестком режиме нагружения представлены на рисунке 3.

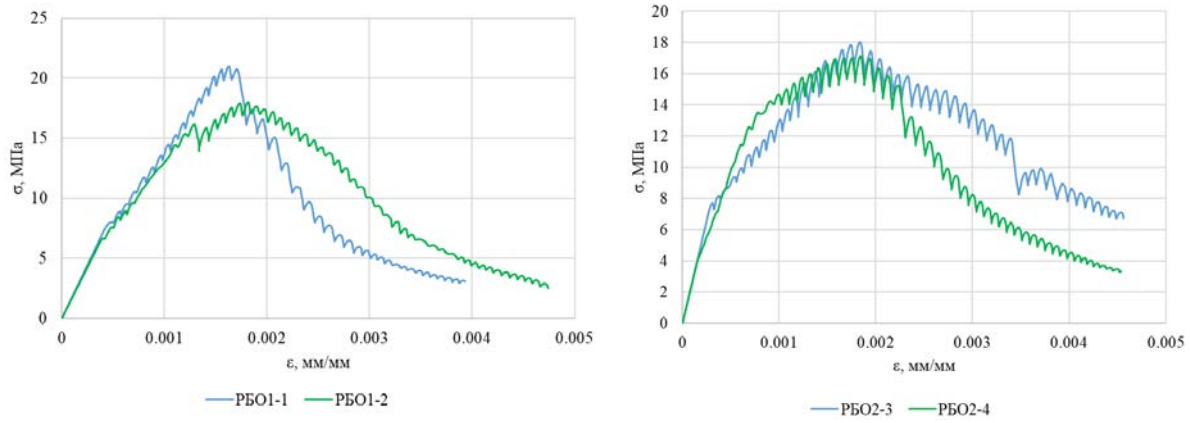


Рис. 3. Общий вид диаграмм «σ -ε» образцов-цилиндров РБО 1 и РБО2 при осевом сжатии

2. Результаты испытания бетонных цилиндров состав РБК

В качестве одного из направлений по модификации бетонов с учетом применяемого рециклингового заполнителя на данном этапе рассмотрено применение косвенного армирования.

Элементом косвенного армирования была принята арматурная сетка из стержней класса S240 Ø2 мм с размером ячейки 50×50 мм. Результаты испытания образцов-цилиндров на осевое сжатие в жестком режиме нагружения представлены на рисунке 4.

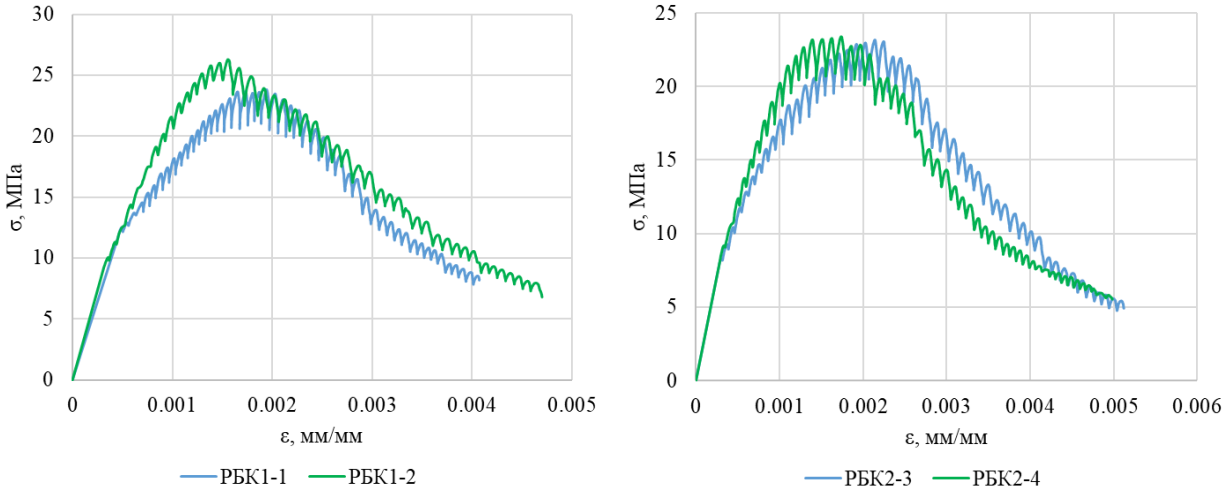


Рис. 4. Общий вид диаграмм «σ -ε» образцов-цилиндров РБК при осевом сжатии в жестком режиме нагружения

Из графиков установлено, что косвенное армирование, применённое в серии РБК, увеличивает прочность рециклингового бетона на сжатие. В то время как серии РБО демонстрируют достаточные прочностные характеристики, они уступают в пластичности и устойчивости к разрушению, что ограничивает их применение без дополнительной модификации.

Так, прочность образцов РБК1-2 на 5% выше по сравнению с РБО2-4 и на 65% выше по сравнению с РБО1-1.

Вывод

1. Анализ статистических данных о наличии, образовании и движении многотоннажных отходов в Республике Беларусь показал, что существует ежегодная потребность в переработке отходов бетонных обломков, отходов бетона и железобетона
2. Проведены экспериментальные исследования бетонных смесей с использованием только рециклингового заполнителя (серия РБО1) и с крупным заполнителем из рециклинга (серия РБО2).
3. Установлено, что смеси серии РБО1 характеризуются низкой удобоукладываемостью, что связано с особенностями структуры переработанного материала.
4. Прочность бетона с рециклинговым заполнителем сопоставима с прочностью бетона на природных заполнителях, что подтверждает возможность его применения в конструкционных бетонах.
5. Повышенное водопоглощение вторично переработанного крупного заполнителя требует его предварительного насыщения водой для обеспечения необходимой удобоукладываемости бетонной смеси.

Список использованной литературы

1. Национальный статистический комитет Республики Беларусь (Белстат). Электронный ресурс. – URL: https://www.belstat.gov.by/ (дата обращения: 01.06.2025).
2. Verian K. P. Using recycled concrete as coarse aggregate in pavement concrete: dis. / Purdue University. 2012.142 p.
3. Verian K. P., Ashraf W., Cao Y. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production // Resources, Conservation and Recycling. 2018. Vol. 133.P. 30-49.
4. Verian K. P., Whiting N. M., Olek J., Jain J., Snyder M. B. Using recycled concrete as aggregate in concrete pavements to reduce materials cost. 2013. 86 p.
5. Etxeberria M., Vázquez E., Marí A., Barra M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete // Cement and concrete research. 2007. Vol. 37. No. 5. P. 735-742.
6. McNeil K., Kang T. H. K. Recycled concrete aggregates: A review // International journal of concrete structures and materials. 2013. Vol. 7. P. 61-69.

7. Kou S. C., Poon C. S. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates // Cement and Concrete composites. – 2009. Vol. 31. No. 9. P. 622-627.

УДК 692.48

ЛЕГКАЯ СТАЛЬНАЯ ФЕРМА ДЛЯ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ЗДАНИЙ

Попова Марина Владиславовна*, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций, **Аминов Михаил Алексеевич**, студент кафедры строительных конструкций

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), popovamv@bk.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования и проектирования стальной фермы для покрытия общественного здания. С использованием программного комплекса Лира 10.12 выполнен статический анализ конструкции, включая сбор постоянных и временных нагрузок, определение геометрических характеристик и подбор сечений элементов с учетом сжатия и растяжения. Рассмотрены этапы проектирования, проверка несущей способности и устойчивости фермы в соответствии с нормативными требованиями. Особое внимание уделено оптимизации сечений и применению гнутых профилей для снижения массы конструкции. Результаты подтверждают надежность и экономичность разработанной фермы, что делает её пригодной для использования в общественных зданиях с большими пролетами. Личный вклад авторов заключается в анализе расчетных данных, оптимизации конструкции и проверке её соответствия нормам.
Ключевые слова: стальная ферма, статический расчет, Лира 10.12, несущая способность, гнутый профиль, устойчивость, нагрузки, общественное здание, сжатие, растяжение.

LIGHTWEIGHT STEEL TRUSS FOR LONG-SPAN BUILDINGS

Popova Marina Vladislavovna*, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures, **Aminov Mikhail Alekseevich**, student of the Department of Building Structures

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs,
(Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), popovamv@bk.ru

Abstract. The article presents the results of research and design of a steel truss used for the roof of a public building. Using the Lira 10.12 software package, a static analysis of the structure was performed, including the collection of permanent and temporary loads, determination of geometric characteristics, and selection of cross-sections for elements under compression and tension. The design stages, verification of load-bearing capacity, and stability of the truss were considered in accordance with regulatory requirements. Special attention was paid to the optimization of cross-sections and the use of bent profiles to reduce the weight of the structure. The results confirm the reliability and cost-effectiveness of the developed truss, making it suitable for public buildings with large spans. The authors' contribution lies in the analysis of calculation data, optimization of the structure, and verification of its compliance with standards.
Keywords: steel truss, static calculation, Lira 10.12, bearing capacity, bent profile, stability, loads, public building, compression, stretching.

Введение

Сегодня проектирование общественных зданий сталкивается с задачей создания конструкций, которые были бы не только прочными, но и экономичными, способными служить годами. Стальные фермы привлекают внимание как один из лучших вариантов для крыш таких объектов, ведь они выдерживают большие нагрузки, оставаясь при этом относительно лёгкими. Эта тема волнует многих инженеров, и я решил заняться ею, потому что оптимизация таких конструкций может существенно снизить затраты на материалы и строительство. В этой работе я расскажу, как с помощью программы Лира 10.12 удалось разработать стальную ферму, проверив её поведение под разными нагрузками. Процесс включал анализ нагрузок, подбор подходящих сечений и оценку прочности с учётом нормативов [1].

Проектирование стальных конструкций опирается на такие документы, как «Стальные конструкции» [1] и «Нагрузки и воздействия» [2], которые задают строгие рамки для расчётов. Использование гнутых профилей оказалось удачным ходом — они уменьшают вес фермы, не жертвуя её способностью выдерживать давление, что особенно ценно для зданий с широкими пролётами. Лира 10.12 стала для меня настоящей находкой: она упрощает расчёты и даёт точные результаты, экономя время [3]. Важность этой работы трудно переоценить, ведь сегодня нужно не просто строить, а создавать безопасные и долговечные объекты, которые вписываются в идеи устойчивого развития.

Методика расчёта

Для расчета фермы использован программный комплекс Лира 10.12, который моделирует статическое поведение конструкции под нагрузками. Исследование включало сбор постоянных (вес кровли, прогонов, коммуникаций) и временных (снеговая нагрузка) нагрузок по СП 20.13330, определение геометрических характеристик фермы, подбор сечений элементов с учетом сжатия и растяжения, а также проверку несущей способности по [4, 5].

Ферма состоит из двух частей: первая – длиной 14 м, высотой 2,02 м; вторая – длиной 8 м, высотой 1,725 м, с уклоном 0,02%. Материал – сталь С255 с расчетным сопротивлением Ry = 2500 кгс/см². Использованы гнутые квадратные и прямоугольные профили для снижения массы [6]. Геометрическая схема представлена на (рис. 1), расчетная – на (рис. 2).

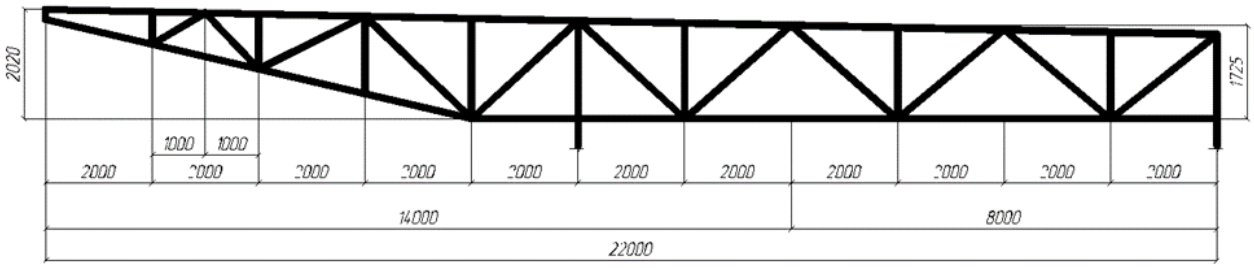


Рис. 1. Геометрическая схема фермы

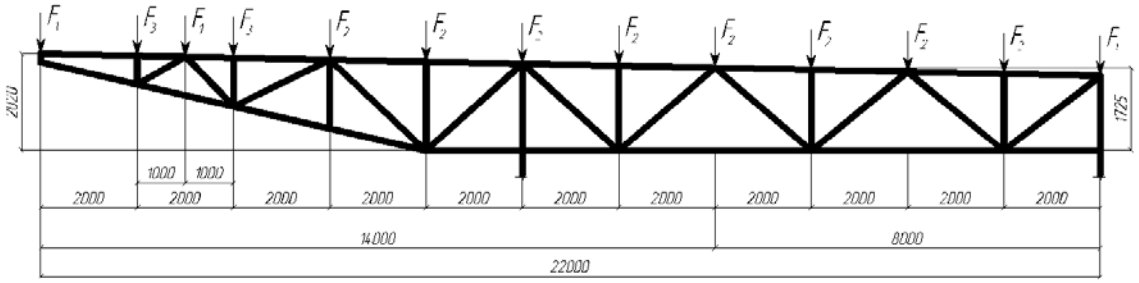


Рис. 2. Расчетная схема фермы

Сбор нагрузок:

Нагрузки рассчитаны по СП 20.13330 [2] и представлены в таблице 1. Постоянные нагрузки включают вес кровельных материалов, утеплителя, прогонов и коммуникаций. Временные нагрузки учитывают снеговую и длительную нагрузки [7].

Таблица 1. Нагрузки на 1 м² покрытия

№	Вид нагрузки	Нормативная, кгс/м²	Коэффициент надежности	Расчетная, кгс/м²
1	Кровельная ПВХ мембрана	5,0	1,2	6,0
2	Разделительный слой стеклохолста	4,0	1,2	4,8
3	Минватные плиты δ=50 мм	20,0	1,2	24,0

Продолжение таблицы 1

4	Минватные плиты δ=100 мм	20,0	1,2	24,0
5	Унифлекс	7,0	1,2	8,4
6	Профлист h=75	12,0	1,1	13,2
7	Стальные прогоны	20,0	1,1	22,0
8	Собственная масса ферм	40,0	1,2	48,0
9	Инженерные коммуникации	50,0	1,1	55,0
	Итого постоянные	178,0	-	205,4
10	Вес снегового покрова	180,0	1,4	252,0
11	Длительно действующая	390,0	1,4	546,0
	Итого временные	570,0	-	798,0
	Всего	748,0	-	1003,4

Расчетная нагрузка на 1 м ригеля: qp = 6020,4 кгс/м.

Номера элементов указаны на рис. 3. Расчет выполнен с учетом сжатия и растяжения по СП 16.13330.

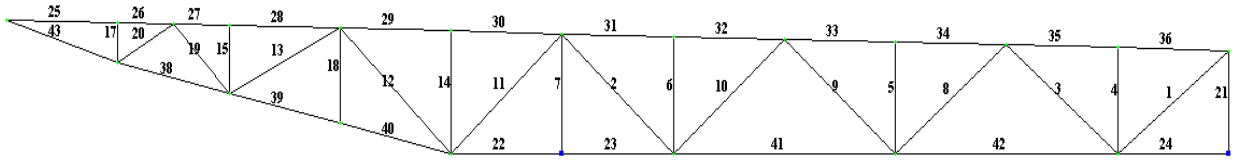


Рис. 3. Номера элементов фермы

Для верхнего пояса (сжатие, N = 105840 кгс) использована формула (1):

$$A = \frac{N}{\varphi \cdot \gamma_c \cdot R_y}, \qquad (1)$$

где φ = 0,81, γc = 0,8, λ = 58,3. Принят профиль 180×180×10 мм (Аф = 68,2 см²). Для нижнего пояса (растяжение, N = 163175 кгс) принят профиль 180×180×10 мм; для элементов с меньшими усилиями (N = 76021,2 кгс) – 160×160×6 мм. Раскосы и стойки рассчитаны на сжатие: для элемента 17 (N = 8856 кгс) принят профиль 80×80×4 мм (Аф = 12,2 см², φ = 0,97). Эпюра и изополя продольных сил представлены на рис. 4 и 5.

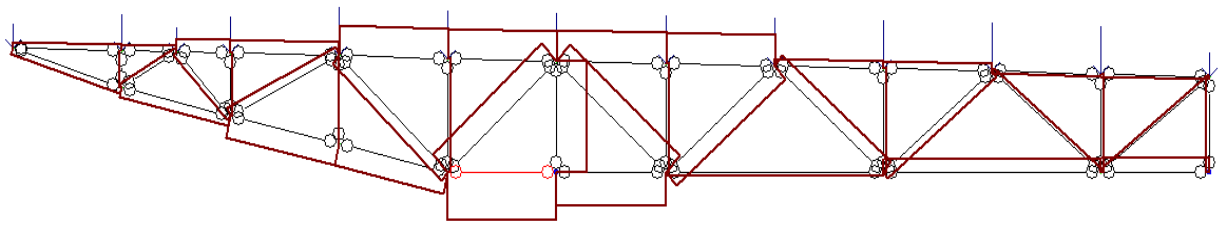


Рис. 4. Эпюра продольных сил N

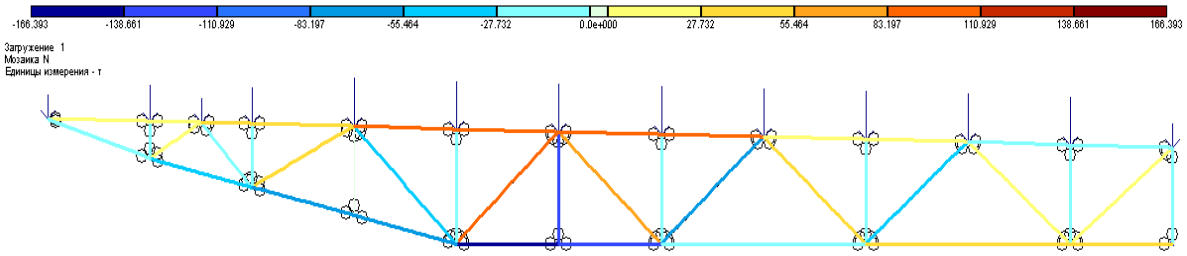


Рис. 5. Изополя продольных сил N

Результаты и обсуждение

Расчеты в Лира 10.12 подтвердили прочность и устойчивость фермы [8]. Гнутые профили снизили массу конструкции, обеспечив экономичность. Максимальная гибкость элементов не превышает нормативных значений, а коэффициенты сжатия соответствуют [1]. Проведен анализ данных, оптимизация разреза и проверка стабильности [9]. Полученные результаты применимы при проектировании покрытий для общественных зданий [10].

Выводы

Разработанная ферма соответствует требованиям прочности и устойчивости, что подтверждено расчетами в Лира 10.12 и проверками по СП 16.13330. Гнутые профили и программное обеспечение обеспечили оптимизацию конструкции. Результаты могут использоваться для проектирования ферм и дальнейших исследований динамических нагрузок.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, госзадание ВлГУ).

Список использованной литературы

1. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. М.: Минстрой России, 2017.
2. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. М.: Минстрой России, 2016.
3. Мельников Н.П. Справочник конструктора. М.: Стройиздат, 1976. 265 с.
4. Маклакова Т.Г., Шарапенко В.Г. Проектирование жилых и общественных зданий. М.: Высшая школа, 1998. 400 с.
5. Мясников, Д. О. Облегченные ребристые плиты перекрытий вспарушенного типа. Международная конференция по физике материалов, строительным конструкциям и технологиям в строительстве, промышленной и производственной инженерии: сборник трудов V международной научно-технической конференции, Владимир, 23–25 апреля 2024 года. – Владимир: АРКАИМ, 2024. – С. 131-135.

6. Мясников Д.О. Этапы блочно-модульного проектирования объектов Строительства. Архитектура. Дизайн: Материалы Пятой Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Курск, 25 апреля 2024 года. Курск: ЗАО Университетская книга, 2024. С. 140–143.
7. Попова, М. В. Напряженное состояние балок с раскосной перфорацией. Международная конференция по физике материалов, строительным конструкциям и технологиям в строительстве, промышленной и производственной инженерии (МРСРЕ-2024): СБОРНИК ТРУДОВ V МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Владимир, 23–25 апреля 2024 года. – Владимир: АРКАИМ, 2024. – С. 141-147.
8. Лисицын А.Б. Программные комплексы в строительном проектировании. М.: АСВ, 2000. 180 с.
9. Гордеев В.Н. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. М.: АСВ, 2007. 240 с.
10. Кудишин Ю.И. Основы проектирования металлических конструкций. М.: Стройиздат, 1990. 280 с.

УДК 69.009

ТИМ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Попова Марина Владиславовна, к.т.н., доцент, **Аминов Михаил Алексеевич**[*], студент, **Тимин Евгений Михайлович**, аспирант

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д.87, 600000, Российская Федерация), aminovmihail5@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются перспективы развития технологий информационного моделирования (ТИМ) в Российской Федерации. В условиях цифровизации. Подчеркивается переход от 2D проектирования внедряются программы технологии информационного моделирования, предполагающие комплексный подход к управлению проектом. Основная идея ТИМ участие во всех этапов строительства, начиная от проектирования заканчивая сносом. Анализируются факторы, способствующие развитию и внедрения ТИМ в России, к ним относятся за государственная поддержка, сокращение ошибок, увеличение производительности. Уже происходит внедрение во многие компании технологии информационного моделирования. В данной статье будут рассмотрены преимущества ТИМ, проблемы с

которыми можно столкнуться, этапы введения и развития в Российской Федерации. Также статья представляет обзор дальнейших перспектив развития технологий информационного моделирования в России, учитывая текущие результаты, тенденции.
Ключевые слова: ТИМ, программное обеспечение, проектирование, модель, развитие.

TIM. DEVELOPMENT PROSPECTS IN THE RUSSIAN FEDERATION

Popova Marina Vladislavovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, **Aminov Mikhail Alekseevich***, student, **Timin Evgeniy Mikhailovich**, graduate student

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (Vladimir, Gorky, 87, 600000, Russian Federation), aminovmihail5@gmail.com

Abstract. The article discusses the prospects for the development of information modeling technologies (TIM) in the Russian Federation. In the context of digitalization. The transition from 2D design is emphasized, and information modeling technology programs are being introduced, suggesting an integrated approach to project management. The main idea of TIM is to participate in all stages of construction, from design to demolition. The factors contributing to the development and implementation of TIM in Russia are analyzed, including government support, error reduction, and increased productivity. Information modeling technology is already being implemented in many companies. This article will discuss the advantages of TIM, the problems that may be encountered, the stages of introduction and development in Russia. The article also provides an overview of the future prospects for the development of information modeling technologies in Russia, taking into account current results and trends.
Keywords: TIM, software, design, model, development

Введение

Строительная отрасль не стоит на месте, одним из драйвером развития является цифровизация. Внедрение технологий информационного моделирования (ТИМ), как и Building Information Modeling (BIM) представляют не только создание 3D-модели, а набор принципов и методов, связанных с жизненным циклом здания [1,2].

Благодаря ТИМ можно объединять все циклы здания: проектирование, строительство, эксплуатация, реконструкция и снос в единую информационную модель. На стадии проектирования происходит разработка с модели, где содержится информация о геометрии, материалах, стоимости, сроках выполнения. Во время эксплуатации ТИМ можно использовать для проведения обследования, капитального ремонта, где в уже имеющиеся модель вносят корректировки [3,4].

Преимущества и недостатки

Преимущества технологий информационного моделирования заключаются в том, что значительно повышается эффективность, увеличивается скорость, сокращаются сроки выполнения работ [5,6]. Это особенно важно для строительной отрасли, потому что сокращение издержек ведет к наиболее высокой производительности. Кроме того, над проектом могут сразу работать несколько участников, что с ускоряет проектирование здания [7,8]. Стоит отметить, про сокращение коллизий. При проектировании в 2D возникают случаи, когда, например, инженерные сети пересекаются друг с другом. Это ведет к дополнительным правкам в проекте, к лишним затратам при строительстве. В информационной модели этого можно избежать, так как здание разрабатывается в 3D, и все пересечения видны или о них предупреждает сама программа.

Несмотря на все эти преимущества, внедрение BIM в строительную отрасль имеет недостатки. Ключевая проблема является высокая стоимость программного обеспечения (ПО). Покупка ПО требует значительных вложений, многие программы сейчас недоступны, а отечественные производители уступают зарубежным. К этому всему необходима переподготовка кадров, так как многие специалисты владеют только 2D проектированием, вследствие чего появляется нехватка квалифицированных кадров [9].

Развитие в Российской Федерации

Первые предпосылки ТИМ на законодательном уровне появились в 2014 году, тогда Минстрой согласно приказу №926 принял план поэтапного внедрения технологий информационного моделирования в области промышленного и гражданского строительства. Начальным шагом является выбор «пилотного» проекта, в котором будет происходить разработка проектной документации.

После того как «пилотные» проекты будут отобраны и направлены в экспертизу, следует провести их оценку специализированными органами экспертизы. Важность данной процедуры заключается в определении качества проектирования, выявлении недостатков и преимуществ, связанных с использованием информационного моделирования,

На третьем и четвертом этапе необходимо провести анализ результатов проектирования и экспертизы отобранных проектов. На основе этого анализа внести изменения в нормативную литературу, своды правил и образовательные стандарты.

Заключительным этапом является подготовка специалистов по использованию ТИМ программ в области промышленного и гражданского строительства.

После поэтапного внедрения и применения пилотных проектов, на законодательном уровне следующее Постановление Правительства РФ №331

вышло 1 января 2022 года. Это стало значимым шагом в направлении цифровизации строительства в Российской Федерации.

Согласно этому постановлению, все участники строительства обязаны формировать информационные модели объектов на этапе проектирования, а также в процессе строительства и эксплуатации объектов. Это включает в себя создание и использование трехмерных моделей, которые содержат не только графические данные, но и информационные, что позволяет оптимизировать процессы проектирования, строительства и управления объектами [10].

Развитие технологий информационного моделирования стремительно набирает обороты, с 1 июля 2024 года внедрение коснулось уже девелоперских компаний. При проектировании многоэтажных жилых зданий необходимо выдавать информационную модель, а в 2025 году необходимо предоставлять информационную модель для малоэтажных зданий.

Перспективы технологий информационного моделирования в России

Технологии информационного моделирования становятся все более востребованы в России. В последние годы произошел существенный переход многих компаний с традиционного 2D проектирования к ТИМ-моделированию. Этот переход связан с несколькими факторами.

Во-первых, одним из драйвером развития технологий информационного моделирования является государство. Благодаря введению законов, внедрение ТИМ становится не только желательным, но и обязательным. Также уже существует нормативная база, своды правил, которые дают правовую оценку и общие требования применения к этим технологиям.

Во-вторых, повышаются требования к качеству и безопасности строительства. Технологии информационного моделированию позволяют минимизировать ошибки и создавать более точные и детализированные модели зданий.

Многие крупные компании уже вовсю применяют ТИМ. К ним относятся «ПИК», «Стройтрансгаз», «Мостотрест».

Таким образом, технологии информационного моделирования в России имеют прочную базу для развития благодаря государственной поддержки, повышению требований к качеству, безопасности и эффективности компаний.

Список использованной литературы

1. Абакумов Р. Г., Наумов А. Е., Зобова А. Г. Преимущества, инструменты и эффективность внедрения технологий информационного моделирования в строительстве // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2017. №5.

2. Илларионова Л.А., Боков С.С. Использование технологий информационного моделирования (ТИМ) для зелёного строительства // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство.

3. Ундозеров В.А. Разработка типовой структуры процессов проектов строительства промышленных зданий с применением ТИМ // Наука и бизнес: пути развития. 2023. № 2(140). С. 70-73.

4. Исупов Н.С., Карманова М.М., Придвижкин С.В., Фомин Н.И., Возможности управления жизненным циклом объекта строительства с применением ТИМ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2023. №1. С. 48-56.

5. Строев Е.А., Шенкман Р.И., Оценка эффективности применения ТИМ в строительстве малоэтажных индивидуальных зданий // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2023. Т.1. С. 320-325.

6. Гурова Е.В., Исупова Д.А., Страхов А.С., Трегубов А.П. Особенности государственного регулирования внедрения ТИМ-технологий в строительстве// Перспективы развития строительного комплекса: Материалы XV Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов. 2021. Т.15. С. 370-374.

7. Трегубов А.П., Страхов А.С., Грицун А.С., Особенности кадрового обеспечения программы внедрения ТИМ-технологий в строительстве // XXVI Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области: сборник материалов конференции. 2022. С. 306-308.

8. Викторов М. Основные аспекты внедрения и применения технологий информационного моделирования (ТИМ) в строительстве // Русский инженер. 2021. С. 15-16.

9. Великанов А.С. Актуальные проблемы и задачи ТИМ. Интероперабельность данных объектов строительства / Архитектоника региональной культуры: сборник научных трудов IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Курск. 2021. – С. 149-153.

10. Гурова Е.В., Внедрение ТИМ-проектирования в строительную сферу / Потенциал интеллектуально одаренной молодежи – развитию науки и образования: Материалы XI Международного научного форума молодых ученых, инноваторов, студентов и школьников. 2022. С. 441-443.

УДК 624.047.2

МЕТОДИКА ВЫБОРА КОНСТРУКТИВНОГО КАРКАСА ЗДАНИЯ НА ОСНОВЕ МНОГОФАКТОРНОГО АНАЛИЗА

Попова Марина Владиславовна*, к.т.н., доцент, кафедра строительных конструкций, **Ханбабаева Анастасия Артуровна**, магистрант

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), popovamv@bk.ru

Аннотация. Представлена авторская методика выбора конструктивного каркаса здания на основе многофакторного анализа. Методика учитывает шесть групп критериев: конструктивные параметры, пожарную безопасность, экономику, энергоэффективность, архитектурную гибкость и эксплуатационные риски. Представлен пример применения методики на проекте общественного здания, где сравниваются железобетонный, стальной и клеёный деревянный каркасы. Показана гибкость методики, её применимость к различным условиям проектирования и возможность автоматизации расчётов. Проведённый анализ показывает, что монолитный железобетонный каркас является наиболее универсальным решением с точки зрения прочности, пожарной безопасности, жёсткости и экономичности при длительной эксплуатации. Клеёная древесина — перспективное решение для архитектурно выраженных объектов и быстровозводимых зданий. Металл выигрывает по скорости монтажа, но требует дополнительных затрат на огнезащиту и изоляцию.

Ключевые слова: каркас здания; сравнительный анализ; железобетон; металл; клеёная древесина.

THE METHOD OF SELECTING THE STRUCTURAL FRAME OF A BUILDING BASED ON MULTIFACTORIAL ANALYSIS

Popova Marina Vladislavovna*, PhD, Associate Professor, Department of Building Structures, **Khanbabaeva Anastasia Arturovna**, Master's student

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), popovamv@bk.ru

Abstract. The article presents an original methodology for selecting a building frame structure based on multifactor analysis. The methodology covers six groups

of criteria: structural performance, fire safety, economic efficiency, energy behavior, architectural flexibility, and operational risks. A case study is provided involving a public building project, comparing reinforced concrete, steel, and glued timber frames. The flexibility of the method, its applicability to different design conditions, and its potential for automation are demonstrated. The analysis shows that a monolithic reinforced concrete frame is the most universal solution in terms of strength, fire safety, rigidity and cost-effectiveness during long-term operation. Glued timber is a promising solution for architecturally expressed objects and prefabricated buildings. Metal wins in terms of installation speed, but requires additional costs for fire protection and insulation.
Keywords: building frame; comparative analysis; reinforced concrete; steel; glued timber.

Введение

Проектирование общественных зданий сегодня – это далеко не только поиск архитектурной выразительности или соответствие нормативам. Существенную роль играет выбор оптимального конструктивного решения, ведь от него зависит не только прочность и надёжность сооружения, но и экономическая эффективность, комфорт эксплуатации, устойчивость к внешним воздействиям, а также скорость возведения. Наиболее часто в качестве основы несущего каркаса применяются монолитный железобетон [1], металлические конструкции [2-6] и клеёная древесина — как по отдельности [5], так и в различных комбинированных вариантах [7-9].

Несмотря на большой выбор технологий, в практике проектирования нередко можно наблюдать ситуацию, когда решение принимается исходя из привычки проектировщика, ограничений бюджета или доступности подрядчиков. Такой подход, при всей его прагматичности, зачастую упускает из виду более удачные решения, особенно если рассматривать здание не только с точки зрения строительства, но и дальнейшей эксплуатации. Именно поэтому возникает потребность в объективной методике, которая позволяет сравнить разные варианты каркаса по множеству параметров и на основе этого сделать взвешенный выбор.

Методы

В рамках данного исследования предложена система сравнительной оценки конструктивных решений, основанная на балльной шкале и весовых коэффициентах, построенных на критериях, приведенных в табл. 1.

Таблица 1. Группы критериев методики оценки каркасов здания

№	Группа критериев	Обозначение	Вес в итоговой оценке
1	Конструктивные характеристики	К	30 %
2	Пожарная безопасность и акустика	Р	20 %
3	Экономика (CAPEX + OPEX)	Е	25 %

Продолжение таблицы 1

4	Энергоэффективность	T	10 %
5	Архитектурная адаптивность	A	10 %
6	Риски и уязвимости	R	5%

Оценки присваиваются по заранее установленным шкалам, содержащим описания для диапазонов баллов от 0 до 10.

Формула расчёта интегрального балла для каждого варианта:

$$I = 0.30 \cdot K + 0.20 \cdot P + 0.25 \cdot E + 0.10 \cdot T + 0.10 \cdot A + 0.05 \cdot R. \qquad (1)$$

Итоговый показатель рассчитывается по формуле:

$$R = \Sigma(w_i \times x_i), \qquad (2)$$

где R — итоговая оценка, w_i — вес критерия, x_i — оценка по данному критерию в пределах от 1 до 10.

Все показатели были условно разделены на шесть основных групп:

1. Физико-конструктивные характеристики – несущая способность, вес, возможность перекрытия больших пролётов.
2. Пожарная и звукоизоляция – устойчивость к огню, акустический комфорт.
3. Экономика – стоимость устройства каркаса, а также сопутствующие расходы на защиту, отделку, обслуживание.
4. Теплотехнические свойства – теплопроводность, способность аккумулировать тепло.
5. Архитектурная гибкость – насколько конструкция допускает реализацию сложных форм, высотных решений, открытых пространств.
6. Технологичность и надёжность – насколько легко собрать каркас, как он ведёт себя в эксплуатации, есть ли проблемы с соединениями и т.д.

Каждый критерий можно адаптировать под конкретные условия. К примеру, в регионах с суровым климатом особое внимание уделяется теплотехническим свойствам, а в условиях плотной городской застройки, где важны сроки и компактность оборудования, на первый план выходит технологичность.

Результаты и обсуждение

Методика была протестирована на примере проектируемого Центра молодёжных инициатив ВлГУ. В качестве альтернативных решений каркаса здания рассматривались три варианта:

- монолитный железобетон,
- металлический каркас на сварке,

- конструкция из клеёной древесины.

Сравнительную характеристику каркасов можно представить в виде табл. 2-11.

Таблица 2. Группа 1: Конструктивные параметры (вес 30%)

Вариант	Балл	Обоснование
Железобетон	9.0	Высокая несущая способность (до 1000 кН), минимальные деформации, жёсткость на уровне 30 ГПа.
Клеёная древесина	7.0	Несущая способность ограничена (~500–700 кН), меньшая жёсткость (11–14 ГПа), чувствительность к влажности.
Металл	8.0	Прочность высокая (до 1200 кН), но требует дополнительных связей, чувствительность к температурным деформациям.

Таблица 3. Группа 2: Пожарные и акустические свойства (вес 20%)

Вариант	Балл	Обоснование
Железобетон	9.5	R120–R180 без защиты, хорошая звукоизоляция перекрытий (Rw до 55 дБ), массив гасит вибрации.
Клеёная древесина	7.0	Обеспечивает R30–R60 по расчёту, обугливание даёт предсказуемость, но требует увеличенных сечений.
Металл	5.5	Без защиты R0, критическая потеря прочности >500 °C, плохая звукоизоляция (Rw ~30 дБ).

Таблица 4. Группа 3: Экономика (CAPEX + OPEX) (вес 25%)

Вариант	Балл	Обоснование
Железобетон	8.0	CAPEX: ~12 000 руб/м², OPEX: низкий (~150 руб/м²/год), срок службы 100 лет.
Клеёная древесина	7.5	CAPEX: выше (~13 000 руб/м²), OPEX: выше (~280 руб/м²/год), срок службы 60 лет (при контроле).
Металл	6.5	CAPEX: ~13 500 руб/м², OPEX: выше (~250 руб/м²/год), нуждается в антикоррозионной защите.

Таблица 5. Группа 4: Энергоэффективность (вес 10%)

Вариант	Балл	Обоснование
Железобетон	6.0	Высокая теплопроводность (1,4–1,7 Вт/м·К), мостики холода, требует внешнего утепления.
Клеёная древесина	9.0	Отличные показатели (λ ~0,13–0,18 Вт/м·К), может не требовать дополнительного утепления.
Металл	5.0	λ стали >45 Вт/м·К, всегда требует терморазрывы, утепление и защиту от конденсата.

Таблица 6. Группа 5: Архитектура и эксплуатация (вес 10%)

Вариант	Балл	Обоснование
Железобетон	8.5	Гибкость в планировке, надёжность узлов, совместимость с любой отделкой, скрытая эстетика.
Клеёная древесина	9.5	Может выступать финишным интерьером, пластичность для архитектурных решений, лёгкая адаптация.
Металл	7.0	Открытый индустриальный стиль, требует дизайнерской поддержки, сложнее в отделке.

Таблица 7. Группа 6: Риски и уязвимости (вес 5%)

Вариант	Балл	Обоснование
Железобетон	9.0	Не боится влаги, коррозии, биоповреждений, легко ремонтируется, устойчив при климатических перепадах.
Клеёная древесина	6.5	Требует постоянного контроля влажности, защиты от УФ, риска усушки и биопоражения при плохой вентиляции.
Металл	6.0	Коррозия, конденсат, необходимость регулярного обслуживания, сложности сварки в зимних условиях.

Таблица 8. Монолитный железобетон

Группа критериев	Балл	Вес	Вклад в рейтинг
Конструктивные (K)	9.0	0.30	9.0 × 0.30 = 2.70
Пожарные/Акустика (P)	9.5	0.20	9.5 × 0.20 = 1.90
Экономика (E)	8.0	0.25	8.0 × 0.25 = 2.00
Энергоэффективность (T)	6.0	0.10	6.0 × 0.10 = 0.60
Архитектура (A)	8.5	0.10	8.5 × 0.10 = 0.85
Риски (R)	9.0	0.05	9.0 × 0.05 = 0.45
Итого:			**8.50**

Таблица 9. Клеёная древесина (GLT/LVL)

Группа критериев	Балл	Вес	Вклад в рейтинг
Конструктивные (K)	7.0	0.30	7.0 × 0.30 = 2.10
Пожарные/Акустика (P)	7.0	0.20	7.0 × 0.20 = 1.40
Экономика (E)	7.5	0.25	7.5 × 0.25 = 1.875
Энергоэффективность (T)	9.0	0.10	9.0 × 0.10 = 0.90
Архитектура (A)	9.5	0.10	9.5 × 0.10 = 0.95
Риски (R)	6.5	0.05	6.5 × 0.05 = 0.325
Итого:			**7.55**

Таблица 10. Стальной каркас

Группа критериев	Балл	Вес	Вклад в рейтинг
Конструктивные (K)	8.0	0.30	8.0 × 0.30 = 2.40
Пожарные/Акустика (P)	5.5	0.20	5.5 × 0.20 = 1.10
Экономика (E)	6.5	0.25	6.5 × 0.25 = 1.625
Энергоэффективность (T)	5.0	0.10	5.0 × 0.10 = 0.50
Архитектура (A)	7.0	0.10	7.0 × 0.10 = 0.70
Риски (R)	6.0	0.05	6.0 × 0.05 = 0.30
Итого:			**6.625**

Таблица 11. Финальная таблица интегральных рейтингов

Вариант	Итоговый балл из 10
Монолитный железобетон	8.50
Клеёная древесина	7.55
Металл	6.63

Результаты сравнительной оценки показали следующее: железобетонный каркас получил наивысшую итоговую оценку (8,4 балла), главным образом за счёт прочности, огнестойкости и хорошей звукоизоляции. Стальной каркас (7,5 балла) оказался лидером по скорости монтажа и лёгкости

конструкции, но проиграл по тепло- и шумоизоляции. Древесина (7,1 балла) набрала меньше всего, однако выделялась по экологичности и архитектурной выразительности.

Выводы

1. Проведённый анализ показывает, что монолитный железобетонный каркас является наиболее универсальным решением с точки зрения прочности, пожарной безопасности, жёсткости и экономичности при длительной эксплуатации.

2. Клеёная древесина — перспективное решение для архитектурно выраженных объектов и быстровозводимых зданий. Сталь выигрывает по скорости монтажа, но требует дополнительных затрат на огнезащиту и изоляцию.

3. Предложенная методика позволяет настраивать веса и критерии, а значит, подстраиваться под специфику каждого здания — будь то школа, музей или спортивный центр.

4. Методика также легко интегрируется в цифровые инструменты проектирования, в том числе в BIM-среду. Это открывает возможности для автоматизации сравнения вариантов на ранних этапах, ещё до начала работы над рабочей документацией.

5. Предложенный подход позволяет не только систематизировать процесс выбора конструктивной схемы, но и сделать его более прозрачным, обоснованным и, главное, адаптированным к реальным задачам проектирования.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, госзадание ВлГУ).

Список использованной литературы

1. И. И. Шишов, М. С. Сергеев, М. С. Лисятников [и др.] Совместное деформирование железобетонного ригеля с колоннами в покрытии одноэтажного промышленного здания // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 3(101). – С. 75-86. – DOI 10.33979/2073-7416-2022-101-3-75-86. – EDN DAFCME.

2. M. S. Lisyatnikov, S. I. Roshchina, E. S. Prusov, V. B. Deev. Enhancing the efficiency of using deformable aluminum alloys in composite constructions // Non-Ferrous Metals. – 2024. – No. 2. – P. 75-83. – DOI 10.17580/nfm.2024.02.12. – EDN GFAVMS.

3. M. V. Lukin, A. A. Strekalkin, V. B. Deev, S. I. Roshchina. Evaluation of steel grade effects on stress-strain behavior of joint connectors: a finite element

approach // CIS Iron and Steel Review. – 2024. – Vol. 27. – P. 48-54. – DOI 10.17580/cisisr.2024.01.07. – EDN MVPKJM.

4. Попова М.В., Лукина А.В., Сергеев М.С., Мэй Шунги, Strength and deformability of light-weight metal trusses with elements from cut I-beams // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 896 (2020) 012061. 2020. – P. 1-11. – DOI 10.1088/1757-899X/896/1/012061.

5. M. V. Lukin, M. S. Lisyatnikov, D. V. Reva, S. I. Roshchina. Application of deformable aluminum alloys in the construction industry: current trends and future perspectives // Non-Ferrous Metals. – 2024. – No. 2. – P. 1-83. – DOI 10.17580/nfm.2024.02.12. – EDN GFAVMS.

6. В. А. Мартынов, М. С. Лисятников, А. В. Лукина, С. И. Рощина. Применение термически поврежденной древесины в деревоклееных балочных конструкциях // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2024. – № 1(397). – С. 168-181. – DOI 10.37482/0536-1036-2024-1-168-181. – EDN ESOYGS.

7. M. V. Lukin, S. I. Roshchina, A. V. Lukina, V. I. Rimshin. Computer Modeling of Energy-Efficient Joints of Wood Composite Panels // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2024. – Vol. 20, No. 1. – P. 68-80. – DOI 10.22337/2587-9618-2024-20-1-68-80. – EDN LSRINA.

8. Strength properties of raw wood after a wildfire / A. Lukina, M. Lisyatnikov, M. Lukin [et al.] // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – No. 3(119). – DOI 10.34910/MCE.119.7. – EDN JIUHQK.

9. M. Lisyatnikov, A. Lukina, M. Lukin, S. Roschina. Experimental study of a wooden girder truss with composite chords // Architecture and Engineering. – 2024. – Vol. 9, No. 2. – P. 47-56. – DOI 10.23968/2500-0055-2024-9-2-47-56. – EDN IFJAHS.

УДК 669-1

КИНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ МЕЖФАЗНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АЛЮМИНИЕВОГО РАСПЛАВА С ХРОМОМ

Рева Дмитрий Вадимович, ассистент кафедры строительных конструкций ИАСЭ, **Васильева Анастасия Анатольевна***, студент 2 курса ИАСЭ

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), anna.stsha@gmail.com

Аннотация. Работа посвящена кинетическому анализу процессов структурообразования при получении литых композитов, армированных алюминидами хрома. Для расчетов использована диффузионно-кинетическая модель, основанная на решении уравнения нестационарной диффузии для полубесконечной области, что позволило количественно оценить параметры межфазного взаимодействия. Кинетика роста диффузионной зоны подчиняется параболическому закону, что подтверждает преобладание диффузионно-контролируемого механизма процесса. Установлено, что значение коэффициента диффузии и ширина диффузионной зоны возрастают с увеличением температуры процесса и времени выдержки. Характер полученных кривых для системы Al–Cr свидетельствует, что процесс диффузии будет замедляться со временем.
Ключевые слова: алюмоматричные композиты, система Al–Cr, коэффициент диффузии, алюминиевые расплавы, кинетический анализ процессов структурообразования.

KINETIC ANALYSIS OF INTERFACIAL INTERACTION OF ALUMINUM MELT WITH CHROMIUM

Reva Dmitry Vadimovich, assistant of the department of building structures of the IASE, **Vasilyeva Anastasia Anatolyevna***, 2nd year student of the IASE

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), anna.stsha@gmail.com

Abstract. This study is devoted to the kinetic analysis of structure formation processes during the production of cast composites reinforced with chromium aluminides. The calculations employed a diffusion-kinetic model based on the solution of the non-steady-state diffusion equation for a semi-infinite domain, which enabled the quantitative assessment of interfacial interaction parameters. The growth kinetics of the diffusion zone obeys a parabolic law, confirming the predominance

of a diffusion-controlled process mechanism. It was established that the diffusion coefficient and the width of the diffusion zone increase with rising process temperature and longer holding time. The nature of the obtained curves for the Al–Cr system indicates that the diffusion process will decelerate over time.
Keywords: aluminum matrix composites, Al–Cr system, diffusion coefficient, aluminum melts, kinetic analysis of structure formation processes.

Введение

Алюминиевые сплавы являются базовым конструкционным материалом современной техники благодаря сочетанию малой плотности, высокой удельной прочности, коррозионной стойкости и хорошей технологичности [1, 2]. Вместе с тем, дальнейшее повышение термостойкости, износостойкости и устойчивости к коррозии материалов на основе алюминиевых сплавов требует их модификации, в том числе путем легирования переходными металлами и формирования в их структуре устойчивых интерметаллидных соединений.

Хром обладает низким коэффициентом диффузии в твёрдом алюминии, расширенной растворимостью при быстром охлаждении и выраженной способностью образовывать термодинамически стабильные фазы Al_7Cr, Cr_2Al_{11}, Cr_4Al_9, Cr_5Al_8 и Cr_2Al [3]. Эти соединения характеризуются высокой температурой плавления, термической устойчивостью и потенциально высокой армирующей способностью по отношению к алюминиевым сплавам. В частности, в ряде исследований [4-6] подтверждено, что сплавы системы Al–Cr могут рассматриваться как альтернативы более тяжелым жаропрочным сталям и дорогостоящим титановым сплавам.

Термодинамический анализ показывает, что система Al–Cr характеризуется образованием твердых растворов на основе (Al) и (Cr) и несколькими промежуточными фазами, формирующимися как перитектическими, так и конгруэнтными реакциями (рис. 1). Такой анализ позволяет с высокой точностью прогнозировать состав и количество равновесных фаз в сплаве в зависимости от температуры и концентрации легирующего элемента. Однако равновесная диаграмма состояния не описывает реальные пути фазообразования при литье, которые определяются кинетикой диффузионных процессов. Термодинамика задает направление и движущую силу протекающих реакций, в то время как кинетика определяет их скорость и конечный результат. Таким образом, для управления формированием дисперсных алюминидов хрома необходим комплексный подход, сочетающий термодинамическое прогнозирование с анализом кинетических закономерностей.

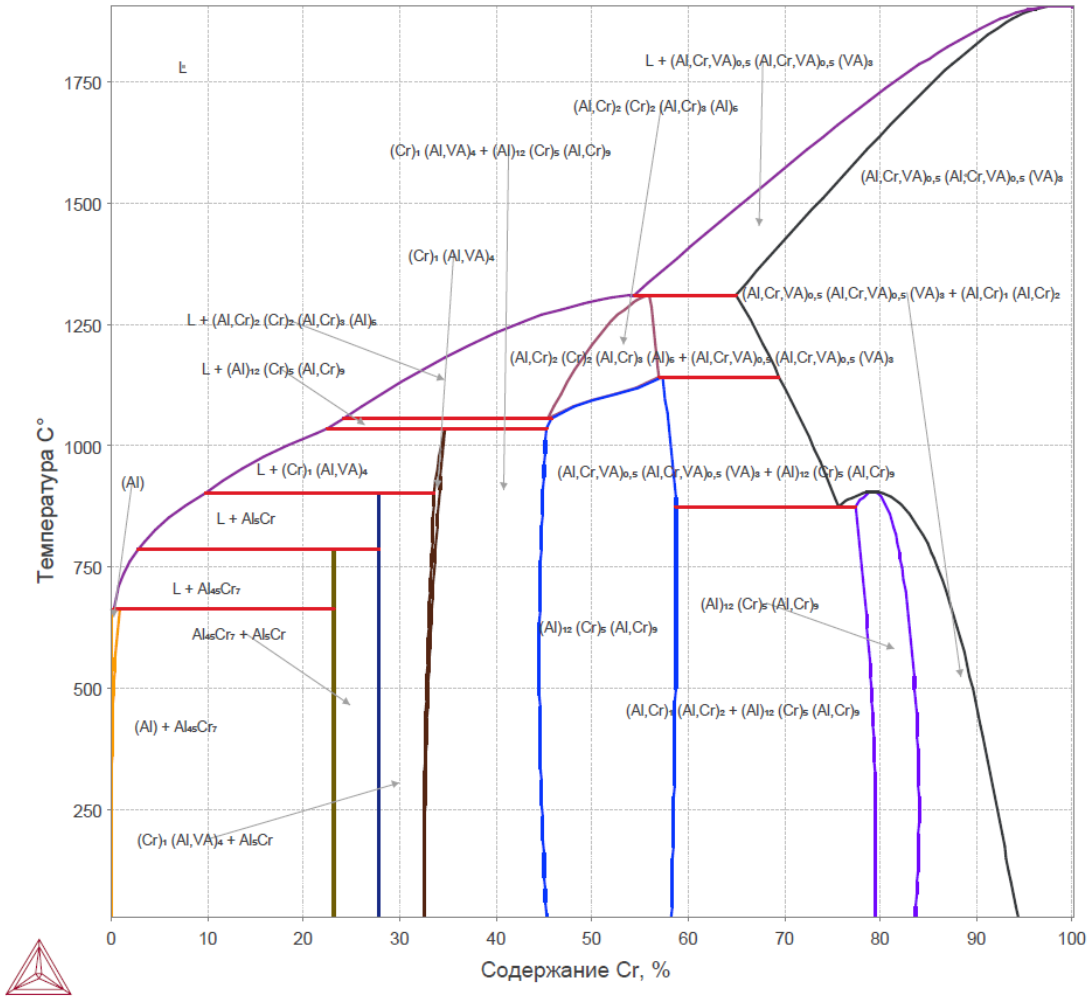


Рис. 1. Диаграмма состояния системы Al-Cr, построенная в программном пакете Thermo-Calc

Современные направления материаловедения направлены в том числе на изучение кинетики взаимодействия переходных металлов с алюминиевыми расплавами, что имеет принципиальное значение для управляемого синтеза алюмоматричных композитов. Литейно-металлургические технологии получения таких композиционных материалов отличаются универсальностью, экономичностью и высокой промышленной адаптируемостью, однако требуют строгого контроля температурно-временных параметров процесса [7-10]. Для их оптимизации необходима количественная оценка диффузионных характеристик и механизмов структурообразования в системе «алюминий–переходный металл».

В связи с этим, целью работы является кинетический анализ процессов структурообразования при получении литых алюмоматричных композитов, армированных алюминидами хрома.

Методы

Для количественного описания межфазного взаимодействия при формировании литых алюмоматричных композитов применялась диффузионно-кинетическая модель, учитывающая совместное действие процессов массопереноса и химического превращения на границе раздела фаз. В основу методики положено предположение о диффузионно-контролируемом режиме, при котором скорость протекания реакции лимитируется переносом вещества через межфазную границу.

Для оценки пространственно-временной эволюции концентрационного профиля использовалось аналитическое решение уравнения нестационарной диффузии для полубесконечной области, позволяющее определить характер изменения концентрации диффундирующего компонента в зависимости от расстояния и времени, а также вычислить положение границы эффективного распространения вещества. Глубина проникновения определялась как расстояние, на котором концентрация диффундирующего элемента снижается до пренебрежимо малого значения, что соответствует практически завершенному диффузионному проникновению.

Кинетический анализ процессов на межфазной границе выполнялся с сопоставлением экспериментальных данных с моделью реакции первого порядка, модифицированной с учетом диффузионных ограничений. Такой подход позволил установить соотношение между скоростью химического взаимодействия и интенсивностью массопереноса, что обеспечивает комплексное описание механизма формирования переходной зоны в системе «матрица – армирующая фаза».

Результаты и обсуждение

Зависимости коэффициента диффузии от температуры, ширины диффузионной зоны от времени выдержки и температуры для системы «алюминий-хром» представлены на рис. 2-4.

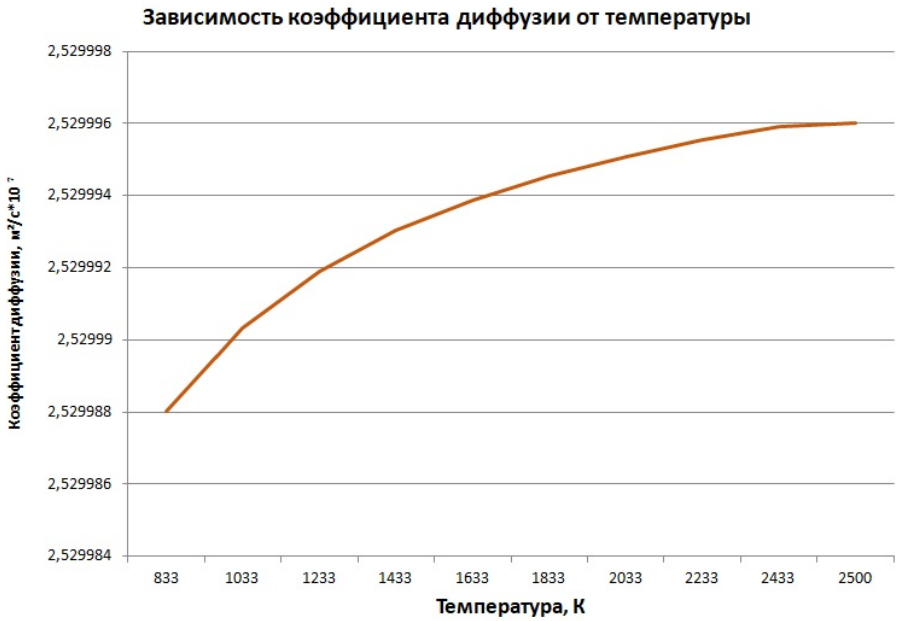


Рис. 2. Зависимость коэффициента диффузии от температуры в системе «алюминий – хром»

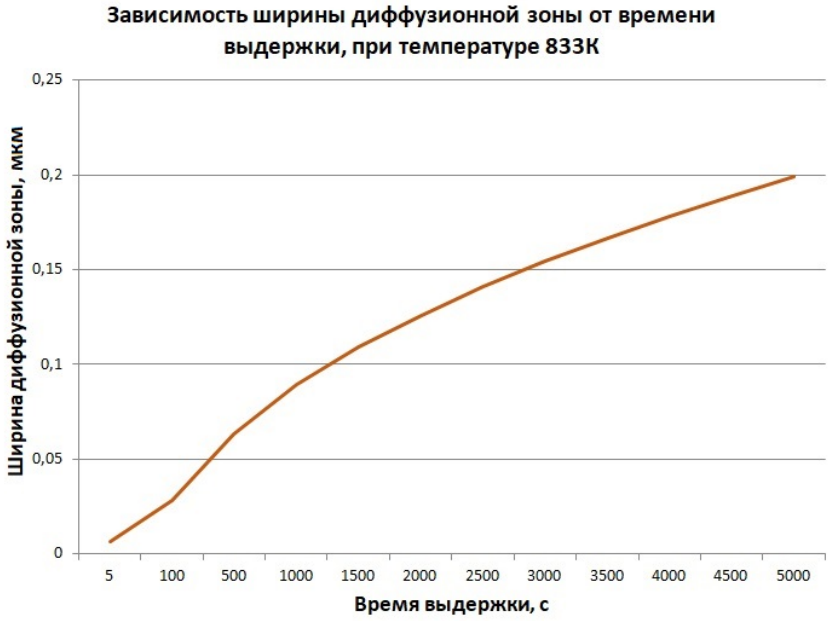


Рис. 3. Зависимость диффузионной зоны от времени выдержки, при температуре 833 К в системе «алюминий – хром»

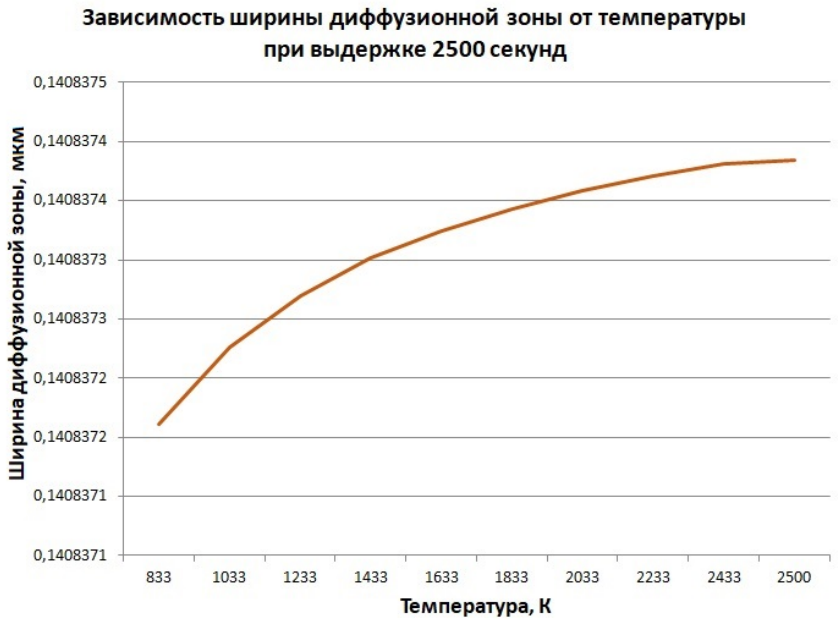


Рис. 4. Зависимость ширины диффузионной зоны от температуры при выдержке 2500 секунд в системе «алюминий – хром»

В исследованном интервале температур от 833 до 2500 К коэффициент диффузии хрома в алюминиевом расплаве изменяется незначительно, составляя величину порядка $2{,}53 \cdot 10^{-7}$ м^2/с. Следовательно, процесс лимитируется не термической активацией, а иными факторами. Отсюда может следовать важный технологический вывод о том, что дальнейшее повышение температуры не приведет к значительному ускорению массопереноса. Анализ кинетики роста диффузионной зоны во времени подчиняется классическому параболическому закону роста, что свидетельствует о преобладании диффузионно-контролируемого механизма процесса, когда скорость реакции на межфазной границе существенно выше скорости подвода реагента через утолщающийся слой продукта. Это означает, что для управления морфологией и толщиной образующихся алюминидов хрома основным технологическим параметром будет именно время выдержки расплава, а не температура (после достижения ее определенного порогового значения).

В целом, представленные данные свидетельствуют, что значение коэффициента диффузии и ширина диффузионной зоны возрастают с увеличением температуры процесса и времени выдержки. При этом характер полученных кривых для всех систем Al–Cr подтверждает, что процесс диффузии будет замедляться со временем.

Выводы

Проведены расчеты кинетических характеристик взаимодействия алюминиевого расплава с хромом. Установлено, что значение коэффициента диффузии и ширина диффузионной зоны возрастают с увеличением температуры процесса и времени выдержки. Характер полученных кривых для

системы Al–Cr свидетельствует, что процесс диффузии будет замедляться со временем.

Список использованной литературы

1. ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys, J.R. Davis, Ed., ASM International, 1993.
2. X. You, Z. Xing, S. Jiang, Y. Zhu, Y. Lin, H. Qiu, R. Nie, J. Yang, D. Hui, W. Chen, Y. Chen. A review of research on aluminum alloy materials in structural engineering. Developments in the Built Environment. 2024, Vol. 17, 100319.
3. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов: моногр. / Н.А. Белов – М.: Изд. Дом МИСиС, 2010. – 511 с. ISBN 978-5-87623-375-2
4. Almeida, A., & Vilar, R. (2010). Al–Al_7Cr eutectic in Al–Cr alloys synthesized by laser alloying. Scripta Materialia, 63(8), 811–814. https://doi.org/10.1016/J.SCRIPTAMAT.2010.06.022
5. Vojtěch, D., Michalcová, A., & Novák, P. (2008). Structural Evolution of Al-Cr Alloy during Processing. Solid State Phenomena, 138, 145–152. https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/SSP.138.145
6. Datta, S., & Banerjee, M. K. (2000). Fracture toughness of Al-Cr alloys with minor additions. Canadian Metallurgical Quarterly, 39(1), 65–72. https://doi.org/10.1179/CMQ.2000.39.1.65.
7. Панфилов А. В. Современное состояние и перспективы развития литых дискретно-армированных алюмоматричных композиционных материалов // Литейщик России. 2008. № 7. С. 23-28.
8. Панфилов А.В., Прусов Е.С. О получении и свойствах комплексно-армированных композиционных материалов с алюминиевой матрицей // Литейное производство. 2008. № 8. С. 1-9.
9. Prusov E.S. Modern methods of metal matrix composite alloys production and new approaches to realization of reinforcing scheme. Machines, Technologies, Materials. 2014. Т. 1. С. 11.
10. Амосов А.П., Никитин В.И., Никитин К.В., Рязанов С.А., Ермошкин А.А. Научно-технические основы применения процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для создания литых алюмоматричных композиционных сплавов, дискретно армированных наноразмерными керамическими частицами // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2013. № 8 (26). С. 3-9.

УДК 669-1

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ДИФФУЗИОННОЙ ЗОНЫ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ КОНТАКТЕ В СИСТЕМЕ AL-V

Рева Дмитрий Вадимович, ассистент кафедры строительных конструкций,
Деев Владислав Борисович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник,
Прусов Евгений Сергеевич, д.т.н., профессор кафедры технологий функциональных и конструкционных материалов

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
(г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация),
reva-dima@mail.ru

Аннотация. В работе представлен кинетический анализ процессов взаимодействия в системе Al-V, в частности, проведена количественная оценка влияния температуры и времени выдержки на ширину диффузионной зоны. Моделирование процесса проводилось на основе уравнений Фика для диффузионно-контролируемого массопереноса. Рост диффузионной зоны в системе Al-V замедляется с течением времени, что может быть связано со снижением градиента концентрации и барьерным эффектом образующихся интерметаллидных фаз. Показано, что классическая диффузионная модель дает заниженные оценки толщины зоны взаимодействия, что свидетельствует о необходимости учета кинетики химических реакций на межфазных границах для адекватного описания процесса.
Ключевые слова: алюмоматричный композит; межфазное взаимодействие; ванадий; диффузия; кинетика; интерметаллические соединения; литейные сплавы.

ESTIMATION OF THE PROCESSES OF FORMATION OF THE DIFFUSION ZONE DURING HIGH-TEMPERATURE CONTACT IN THE AL-V SYSTEM

Reva Dmitry Vadimovich, Assistant of the Department of Building Structures,
Deev Vladislav Borisovich, D.Sc., Professor, Chief Researcher, **Prusov Evgeny Sergeevich**, D.Sc., Professor of the Department of Technologies of Functional and Structural Materials

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs,
(Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), reva-dima@mail.ru

Abstract. This paper presents a kinetic analysis of the interaction processes in the Al-V system, with a particular focus on a quantitative assessment of the influence of temperature and holding time on the width of the diffusion zone. The process was simulated based on Fick's equations for diffusion-controlled mass transport. The growth of the diffusion zone in the Al-V system decelerates over time, which can be attributed to a reduction in the concentration gradient and the barrier effect of the forming intermetallic phases. It is demonstrated that the classical diffusion model yields underestimated values for the thickness of the interaction zone, indicating the necessity of incorporating the kinetics of chemical reactions at the interphase boundaries for an adequate description of the process.
Keywords: aluminum matrix composite; interfacial interaction; vanadium; diffusion; kinetics; intermetallic compounds; casting alloys.

Введение

Разработка литых алюмоматричных композитов с дисперсными армирующими фазами высокомодульных тугоплавких соединений является одним из приоритетных направлений в создании новых конструкционных и функциональных материалов для многих высокотехнологичных отраслей современной промышленности, включая общее и специальное машиностроение, атомную энергетику, нефтегазовый комплекс и др. [1,2]. Управляемое формирование алюминидов переходных металлов в структуре алюминиевой матрицы позволяет существенно повысить твердость, жесткость, износостойкость, демпфирующую способность и термическую стабильность материалов [3-6]. Отдельный интерес в этом отношении представляет система Al-V, образующая ряд термодинамически стабильных интерметаллических соединений (Al_3V, Al_9V_5, $Al_{23}V_4$ и др.), способных выступать в качестве эффективной армирующей фазы в композитах при контролируемых условиях [7,8].

Несмотря на наличие достаточно обширных данных по равновесным диаграммам состояния системы Al–V (рис. 1), вопросы кинетики межфазных процессов при жидкофазном взаимодействии компонентов в данной системе исследованы недостаточно. В частности, отсутствуют количественные оценки глубины диффузионных слоев, влияния времени выдержки и температуры на скорость образования интерметаллидов, а также обобщенные модели, описывающие динамику массопереноса в широком температурном диапазоне. Недостаточная изученность кинетики образования и роста интерметаллидных фаз, а также ограниченность данных о закономерностях диффузионного взаимодействия ванадия с алюминием сдерживают разработку эффективных технологических решений при создании алюмоматричных композитов системы Al-V с управляемыми структурно-морфологическими характеристиками.

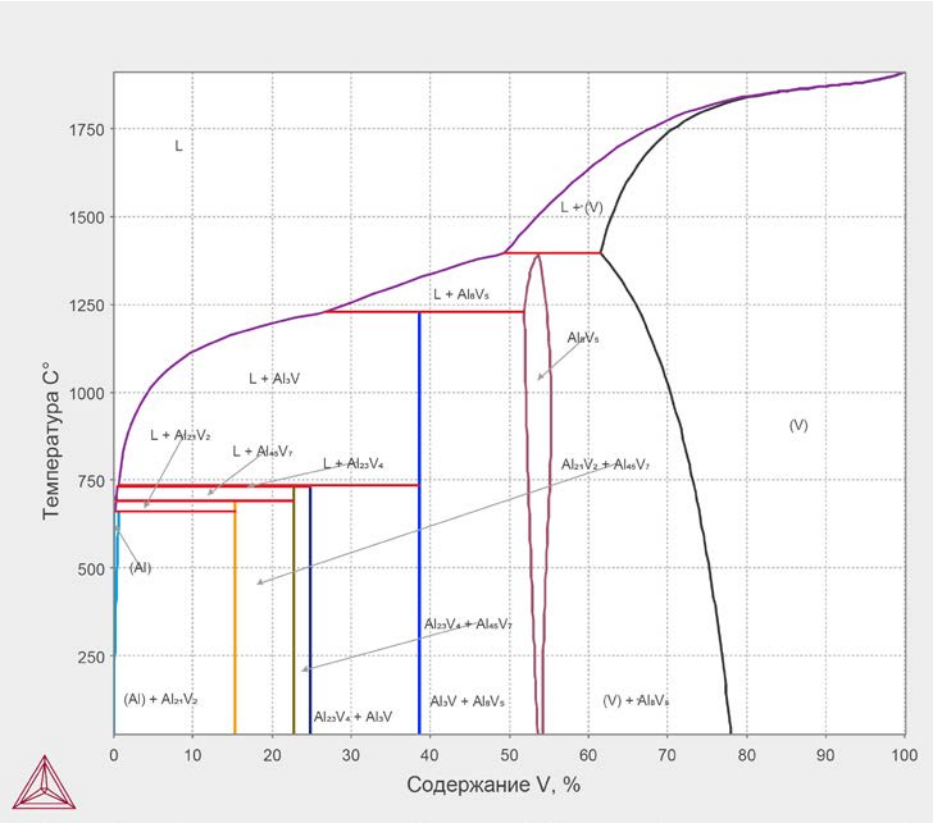


Рис. 1. Диаграмма состояния системы Al-V (Thermo-Calc, TCAL4)

Целью настоящей работы является анализ диффузионных процессов в системе Al-V при жидкофазном получении алюмоматричных композитов путем количественной оценки ширины диффузионной зоны в зависимости от температуры и времени выдержки.

Методы

Объектом исследования в работе выбраны алюмоматричные композиционные материалы с армирующей фазой в виде алюминидов ванадия, получаемые жидкофазным методом. Предметом моделирования является контакт расплава алюминия с твердым ванадием при выдержке в изотермических условиях. В расчетах принимали, что предэкспоненциальный фактор (D_0) равен 3,58 м^2/с·10^{-7} и энергия активации диффузии (E_a) равен 34,6 кДж/моль для диффузии ванадия в алюминии [9].

Для количественного описания межфазного взаимодействия при получении алюмоматричных композитов применялась модель диффузионного массопереноса, основанная на уравнениях Фика и кинетических уравнениях химической реакции [10]. В предположении диффузионно-контролируемого режима поток вещества через границу раздела фаз описывался первым законом Фика:

$$J = -D\frac{dc}{dx} \quad (1)$$

где J – плотность диффузионного потока, D – коэффициент диффузии, зависящий от температуры по уравнению Аррениуса:

$$D = D_0 e^{-\frac{E_0}{RT}} \quad (2)$$

где D_0 – константа (предэкспоненциальный фактор);
E_0 – энергия активации диффузии.

Для оценки глубины проникновения вещества во времени применялась аналитическая форма решения второго закона Фика для полубесконечной области:

$$c = c_0(1 - erfZ) \quad (3)$$

$$Z = \frac{\bar{x}}{2\sqrt{Dt}} \quad (4)$$

где erf Z – функция ошибок Гаусса.

Расстояние L, на которое за время t продвигается фронт диффузии, определяли как $L = 5{,}6\sqrt{Dt}$, что соответствует снижению концентрации до 0,1% от значения на границе раздела фаз. Кинетический анализ включал сопоставление с моделью реакции первого порядка при наличии диффузионных ограничений.

Результаты и обсуждение

Расчетные данные по диффузионным характеристикам системы «алюминий-ванадий» представлены на рис. 2-4.

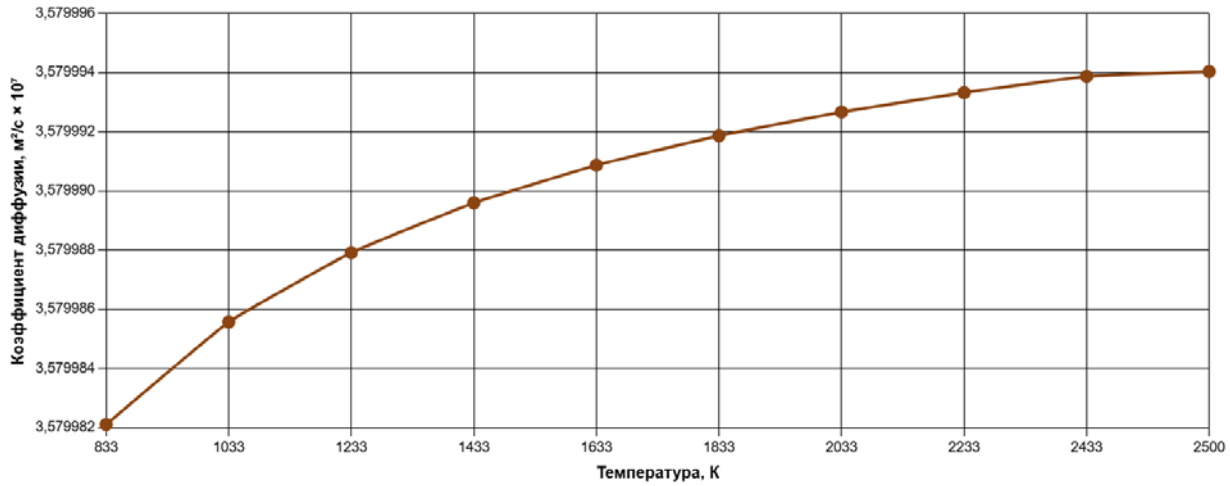


Рис. 2. Зависимость коэффициента диффузии от температуры в системе «алюминий – ванадий»

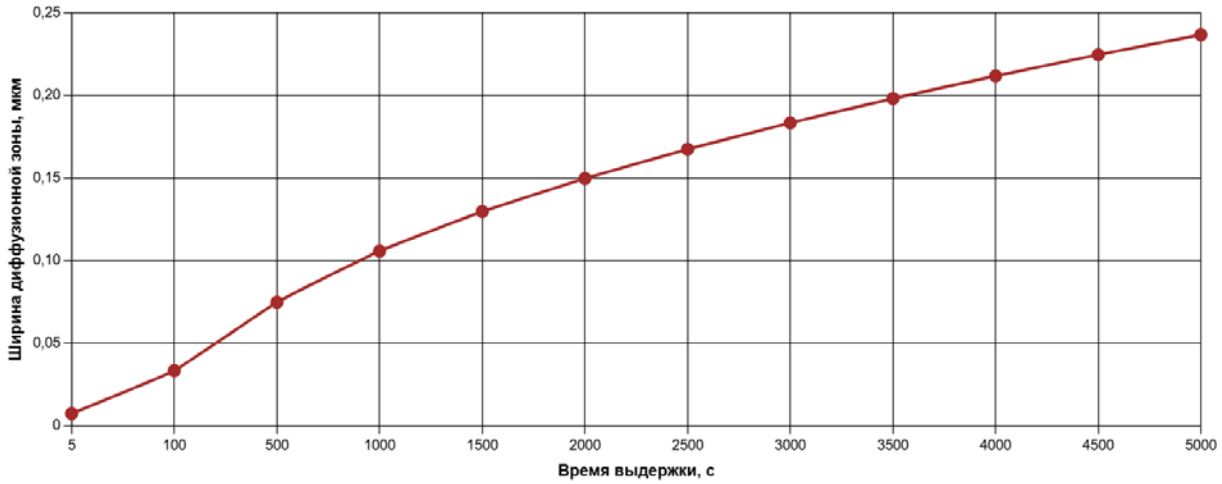


Рис. 3. Зависимость ширины диффузионной зоны от времени выдержки, при температуре 833 К в системе «алюминий – ванадий»

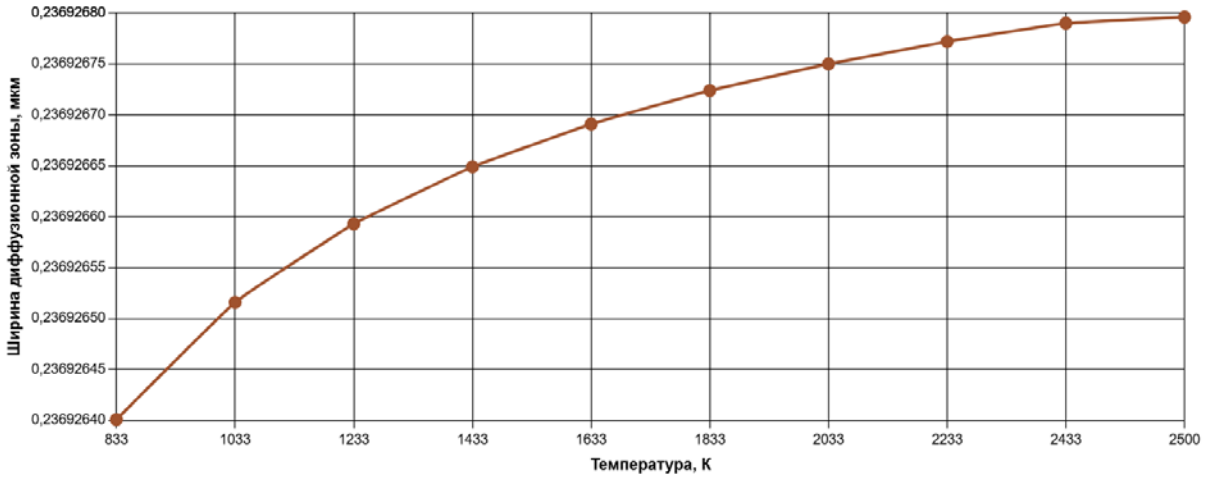


Рис. 4. Зависимость ширины диффузионной зоны от температуры при выдержке 5000 секунд в системе «алюминий – ванадий»

Коэффициент диффузии ванадия в алюминии в рассмотренном температурном диапазоне (833–2500 К) изменяется незначительно, что, вероятно, связано с низкой энергией активации процесса и может указывать на то, что при данных условиях кинетика диффузии лимитируется не термическим фактором. Расчетная ширина диффузионной зоны L демонстрирует низкую чувствительность к температуре и не превышает 0,24 мкм даже для максимальной выдержки 5000 с при 2500 К. Зависимость L от времени имеет классический параболический характер ($L \sim t$), что свидетельствует о диффузионно-контролируемом режиме в рамках используемой модели. Следует отметить, что с течением времени рост диффузионного слоя замедляется, что можно интерпретировать как переход системы в квазистационарный режим, при котором формирующаяся алюминидная фаза начинает выполнять роль барьера для дальнейшего массопереноса.

Кроме того, следует отметить, что применимость классических уравнений Фика к системам с интенсивным образованием интерметаллидов часто оказывается ограниченной, поскольку реальная кинетика может лимитироваться и скоростью химических реакций (см., например, [11]). Фактически, в данном случае скорость процесса будет определяться не переносом атомов через уже сформированный слой, а скоростью химических реакций на границах раздела фаз, которые имеют существенно более высокие энергии активации. Речь в том числе может идти о скорости роста алюминидов типа Al_3V. За счет этого реальная толщина зоны взаимодействия (слоя интерметаллидов) в подобных системах при сравнимых температурах и временах выдержки может составлять десятки микрометров. Таким образом, низкое расчетное значение диффузионных характеристик процесса может указывать на то, что лимитирующей стадией является не диффузия, а химическая реакция и рост интерметаллидных слоев, которые будут вносить наибольший вклад в суммарную толщину зоны межфазного взаимодействия.

Выводы

Проведен кинетический анализ межфазного взаимодействия в системе Al-V на основе классической диффузионной модели. Анализ полученных данных демонстрирует, что с увеличением температуры и времени изотермической выдержки наблюдается рост ширины формирующейся диффузионной зоны. Характер полученных кинетических кривых для системы Al–V указывает на то, что по мере развития процесса происходит замедление диффузии, что может быть обусловлено снижением градиента концентрации и накоплением продуктов взаимодействия на границе раздела фаз.

Список использованной литературы

1. Панфилов А.А., Прусов Е.С., Кечин В.А. Металлургия алюмоматричных композиционных сплавов: монография. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2017. 192 с.

2. Панфилов А.В., Прусов Е.С. О получении и свойствах комплексно-армированных композиционных материалов с алюминиевой матрицей // Литейное производство. 2008. № 8. С. 1-9.

3. Kimura T., Nakamoto T., Ozaki T., Miki T. Microstructures and mechanical properties of aluminum-transition metal binary alloys (Al-Fe, Al-Mn, and Al-Cr) processed by laser powder bed fusion. Journal of Alloys and Compounds. 2021. Vol. 872. Article No. 159680.

4. Ma S., Wang X. Mechanical properties and fracture of in-situ Al_3Ti particulate reinforced A356 composites. Materials Science and Engineering A. 2019. Vol. 754. P. 46–56.

5. Ma S., Wang Y., Wang X. The in-situ formation of Al_3Ti reinforcing particulates in an Al-7wt%Si alloy and their effects on mechanical properties. Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 792. P. 365–374.

6. Liu Z.W., Han Q., Li J.G. Formation of small blocky Al_3Ti particles via direct reaction between solid Ti powders and liquid Al. Metallurgical and Materials Transactions A. 2012. Vol. 43(12). P. 4460–4463.
7. Meng Y., Yang Y., Li C., Cao L., Zhao Z., Zhu Q. Cui J. Evolution of V-containing phases during preparation of Al-based Al−V master alloys. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2022. Vol. 32, Iss. 7. P. 2110-2124.
8. Yee S.L., Wan H., Chen M., Li L., Li J., Ma X. Development of a cleaner route for Aluminum–Vanadium alloy production. Journal of Materials Research and Technology. 2022. Vol. 16. P. 187-193.
9. Du Y., Chang Y.A., Huang B., Gong W., Jin Z., Xu H., Yuan Z., Liu Y., He Y., Xie F.-Y. Diffusion coefficients of some solutes in fcc and liquid Al: critical evaluation and correlation. Materials Science and Engineering. 2003. Vol. A363. P. 140–151.
10. Mitrovic J. The Fick and Lagrange equations as a basis for the Maxwell-Stefan diffusion equations. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1997. Vol. 40, Iss. 10. P. 2373-2377.
11. Zhao Y., Li J., Qiu R., Shi H. Growth Characterization of Intermetallic Compound at the Ti/Al Solid State Interface. Materials. 2019. Vol. 12. Article No. 472.

УДК 691.7

АНАЛИЗ НОВЫХ АНТИКОРРОЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Рева Дмитрий Вадимович, ассистент кафедры строительных конструкций ИАСЭ, **Катрецкая Виктория Андреевна***, студент 2 курса ИАСЭ

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация),
victoriakatretskaya@gmail.com

Аннотация. Коррозия металлов и их сплавов может привести к самым серьёзным повреждениям, которые могут представлять угрозу безопасности и привести к потере ресурсов и загрязнению окружающей среды ещё до того, как повреждения станут заметными. В статье рассмотрены современные антикоррозионные покрытия, которые направлены на создание супергидрофобных поверхностей металла. Принцип проектирования

антикоррозионных полимерных покрытий рассматривался в двух аспектах: пассивационная защита (активная коррозионная стойкость) и барьерная защита (пассивный физический барьер). Для демонстрации супергидрофобности разработанных поверхностей были протестированы углы контакта с водой и углы скольжения. В результате сравнения данных, полученных в исследованиях, были выявлены преимущества каждого покрытия, и даны рекомендации по области их применения.
Ключевые слова: супергидрофобные покрытия, металлы, коррозия, полиуретановые покрытия.

ANALYSIS OF NEW ANTI-CORROSION COATINGS FOR METAL STRUCTURES

Reva Dmitry Vadimovich, Assistant of the Department of Building Structures of IASE, **Katretskaya Victoria Andreyevna***, 2nd year student of IASE

[1]Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), victoriakatretskaya@gmail.com

Abstract. Corrosion of metals and their alloys can cause the most serious damage, which can pose a safety risk and lead to loss of resources and environmental pollution even before the damage becomes noticeable. This article discusses modern anticorrosive coatings that are aimed at creating superhydrophobic metal surfaces. The design principle of anticorrosive polymer coatings has been considered in two aspects: passivation protection (active corrosion resistance) and barrier protection (passive physical barrier). To demonstrate the superhydrophobicity of the developed surfaces, the angles of contact with water and the angles of sliding were tested. As a result of comparing the data obtained in the studies, the advantages of each coating were identified, and recommendations were given in the field of their application.
Keywords: superhydrophobic coatings, metals, corrosion, polyurethane coatings.

Введение

Металлы и их сплавы остаются основными конструкционными материалами современной инженерной практики благодаря их высокой прочности, технологичности и доступности. Однако эксплуатация металлических конструкций в агрессивных средах неизбежно сопровождается коррозионным разрушением, которое приводит к потере механической целостности, снижению эксплуатационной надежности и значительным экономическим издержкам [1]. По экспертным оценкам, ежегодные убытки от коррозии достигают нескольких процентов мирового ВВП, а в ряде случаев

коррозионные повреждения становятся причиной техногенных аварий и экологических катастроф. В этой связи создание новых антикоррозионных систем с повышенной устойчивостью к воздействию влаги, кислорода и агрессивных реагентов остаётся одной из ключевых задач материаловедения и химии полимерных покрытий.

Классические подходы к защите металлов, такие как нанесение лакокрасочных материалов, использование ингибиторов коррозии и катодная защита, во многих случаях не обеспечивают требуемой долговременной стабильности. Это обусловлено сложностью адгезионного взаимодействия на границе раздела «покрытие–металл», а также ограниченной способностью традиционных покрытий противостоять механическим и химическим воздействиям в условиях эксплуатации. В связи с этим все большее внимание исследователей привлекают функциональные покрытия с супергидрофобными, антизагрязняющими, самоочищающимися и противообрастающими свойствами, которые способны одновременно выполнять функции физического барьера и активной пассивации поверхности [2].

Настоящая работа посвящена комплексному анализу современных стратегий формирования новых антикоррозионных покрытий для металлических конструкций. Особое внимание уделено взаимосвязи между архитектурой поверхности, химическим составом и эксплуатационными свойствами покрытий, определяющими их эффективность в условиях многокомпонентной коррозионной среды.

Антикоррозионные полиуретановые покрытия NP-GLIDE

Принцип проектирования антикоррозионных полимерных покрытий всегда рассматривался в двух аспектах: (1) пассивационная защита (активная коррозионная стойкость). Ингибиторы коррозии могут реагировать непосредственно с металлической основой, образуя пассивирующие пленки до или после возникновения коррозии, таким образом, чтобы замедлить коррозию металлической матрицы [3]; (2) барьерная защита (пассивный физический барьер). Наиболее важной функцией антикоррозионных покрытий является изоляция коррозионных сред и задержка их контакта с металлическими основаниями. Таким образом, отличный барьерный слой с очень небольшим количеством трещин и пор имеет долгосрочные антикоррозионные перспективы. Высокая плотность сшивки смолы и «эффект лабиринта», создаваемый наполнителями, способствуют повышению коррозионной стойкости полимерного покрытия [4].

В статье [5] объединили два принципа проектирования покрытий, наносимых непосредственно на металл, и разработали покрытие NP-Glide с превосходными антизагрязняющими и долговечными антикоррозионными свойствами за счет двойной сшивки водородных и ковалентных связей. В результате, эффект координации между дофаминметакриламидом и подложкой из алюминиевого сплава послужил не только ингибитором

коррозии для улучшения долгосрочной коррозионной стойкости покрытий, но и улучшил покрытиям адгезию.

Комплексный подход к разработке прочного и супергидрофобного антикоррозионного покрытия, вдохновленного биомиметическими поверхностными структурами морских звезд

В статье [6] представлен новый и экономичный подход, основанный на биомиметической структуре морской звезды, для разработки прочного и супергидрофобного покрытия.

В этом исследовании в отличие от традиционных методов, представлен тщательно разработанный тетрапольный $ZnO@SiO_2$-фторсилановый композит, который образует уникальную иерархическую микро-нано структуру «ядро-оболочка», снижая поверхностную энергию и обеспечивая исключительные характеристики. В состав входит перфтороктилтриэтоксисилан (FOTS), модифицированный SiO_2, силиконовым полиэстером и тетраподальным ZnO (T-ZnO) из термопластичного полиуретана (TPU), в результате чего получается первый в своем роде T-$ZnO@SiO_2$-FOTS(ZSF) с супергидрофобными свойствами, демонстрируемое углом контакта с водой 160°, углом скольжения 3° и наименьшей свободной энергией поверхности 14,50 мН/м, что способствует превосходным антикоррозийным свойствам (скорость коррозии $1{,}44 \times 10^{-6}$ мм/год) и эффективностью ингибирования коррозии 99.87 %. Кроме того, покрытие обладает высокой механической прочностью, улучшенной адгезией и устойчивостью к агрессивным воздействиям окружающей среды, включая солевые брызги, HCl и NaOH. Биомиметический подход использует дизайн поверхности, вдохновлённый морскими звёздами, и сильно сшитый интерфейс для повышения прочности, что делает это покрытие более устойчивым в реальных условиях.

В работе [6] были усовершенствованы исходные фторированные модифицированные наночастицы SiO_2 и T-ZnO для получения неорганического наполнителя типа «ядро-оболочка», имитирующего поверхностную структуру морской звезды, и в сочетании с термопластичным полиуретаном (TPU) для усиления шероховатой структуры и снижения поверхностного натяжения покрытия, что повышает механическую прочность, способность к самоочистке и устойчивость к обрастанию, бактериям и коррозии.

Примечательно, что T-ZnO может улучшать свойства композита в трёх измерениях, создавая воздушный зазор между агрессивными жидкостями и твёрдыми структурами, тем самым выступая в качестве эффективного антикоррозийного средства.

Результаты данного исследования показывают, что супергидрофобное покрытие продемонстрировало превосходную коррозионную стойкость благодаря образованию стабильной границы раздела между твёрдым телом и жидкостью с кавитацией.

Самособирающееся коррозионностойкое композитное покрытие из жидкого металла на основе клеточных мембран с фототермическими/электротермическими свойствами для предотвращения обледенения/обезледенения

Жидкие металлы считались многообещающими фототермическими/электротермическими противогололёдными материалами из-за их превосходной электропроводности и теплопроводностиклеточных мембран. Однако неизбежное окисление и коррозия ограничивают срок службы и эффективность материалов из жидких металлов.

Самосборка молекул фосфолипидов в самосборное коррозионностойкое покрытие из жидкого металла предназначено для защиты жидкого металла от обледенения и коррозии. Благодаря самосборке молекул фторсиликона, имитирующих молекулы фосфолипидов, и микро-нано морфологии поверхности покрытие имеет угол смачивания водой 150,8° и время задержки обледенения 497 с, что в 4,21 раза больше, чем у немодифицированного жидкого металла. Под совместным воздействием фототермического эффекта при температуре 80,5 °C и супергидрофобности эффективность покрытия в борьбе с обледенением в 2,04 раза выше, чем у немодифицированного жидкого металла. Эффективность фототермического удаления наледи остается на уровне 99,3 % после двух месяцев кислотной коррозии и 94,4 % после двух месяцев щелочной коррозии. Кроме того, тепловая сеть покрытия обеспечивает теплопроводность 3,66 Вт/мК и огнестойкость по стандарту UL94 с классом V0. Покрытие представляет собой электротермическое устройство с температурой нагрева 52,5 °C и способностью к быстрому удалению наледи. Самособирающееся композитное покрытие на основе жидкого металла, вдохновлённое клеточными мембранами, обеспечивает надёжное решение для долгосрочного фототермического и/или электротермического предотвращения обледенения и удаления наледи в условиях воздействия окружающей среды.

Накопление льда наносит большой ущерб материалам, используемым для наружных работ, таким как аэрокосмические, ветряные турбины, линии электропередачи и другие объекты инфраструктуры. В последние годы было разработано множество видов поверхностей, предотвращающих обледенение. Фототермические противообледенительные поверхности и пассивные противообледенительные поверхности без потребления энергии привлекают большое внимание как экологичные и «зеленые». Среди них супергидрофобные фототермические поверхности считаются перспективным материалом для решения проблемы обледенения, поскольку они сочетают в себе преимущества пассивной защиты от обледенения и активной фототермической защиты от обледенения [7].

В статье [8] рассказывают о самосборке фторкремниевого фототермического/электротермического противообледенительного супергидрофобного покрытия. Жидкий металл не только обеспечивает

фототермические свойства, но и формирует супергидрофобную микро- и наноструктуру в качестве носителя фторкремния. Самосборная инкапсуляция, вдохновлённая клеточными мембранами, защищает жидкий металл от окисления и кислотной/щелочной коррозии. В то же время самосборная структура сокращает путь теплопередачи и соединяет изолированные капли жидкого металла. Высокая теплопроводность покрытия делает его огнестойким и способным к эффективному электротермическому удалению наледи. Самосборное покрытие из жидкого металлакомпозитное покрытие может выполнять долгосрочные работы по удалению наледи в неблагоприятных условиях.

В работе [8] разработали и синтезировали высокоэффективное противообледенительное/антиобледенительное, устойчивое к коррозии покрытие с самосборной структурой из жидкого металла, вдохновлённой клеточными мембранами. Покрытие FLM не только обладало супергидрофобностью с углом смачивания водой 150,8°, но и высокой теплопроводностью 3,66 Вт/мК. Благодаря сочетанию супергидрофобных свойств, фототермических свойств и теплопроводности покрытие FLM обладало пассивными свойствами защиты от обледенения, а также фототермическими/электротермическими свойствами для удаления обледенения. Покрытие FLM задерживало обледенение на 497 секунд и было способно к фототермическому удалению обледенения за 28 секунд при плотности световой энергии 1 Вт/см^2 и к электротермическому удалению обледенения за 52 секунды при плотности энергии 4 Вт/см^2. Компактная структура «ядро-оболочка» обеспечила покрытию FLM термическую стабильность и устойчивость к кислотной и щелочной коррозии. Проблема неприспособленности жидкого металла к окислению и коррозии была решена комплексно. Удачная разработка материала для покрытия FLM обеспечила стратегические преимущества в долгосрочной борьбе с обледенением/обмораживанием в неблагоприятных условиях.

Сравнение методов

Для демонстрации супергидрофобности разработанных поверхностей в проанализированных работах были оценены углы контакта с водой и углы скольжения.

В результате выполненной работы в статье [5], получили, что после введения перфторированного мономера в покрытия, полученные методом предварительного нанесения, угол касания капель воды и гексадекана увеличиваются с увеличением содержания перфторированного мономера, соответственно, и увеличение статического угла касания покрытия было незначительным, когда содержание превышало 10% масс., в то время как углы контакта с водой оставались около 106◦. Получили то, что введение перфторированных функциональных мономеров придает покрытию большую гидрофобную поверхность. Однако угол скольжения снижались с увеличением содержания перфторированных мономеров.

В результате разработки покрытия, вдохновленного биомиметическими поверхностными структурами морских звезд [6], получили, что значения угла контакта с водой и угла скольжения покрытия ZSFT составляют 160◦ и 3◦, соответственно, отражая его исключительную супергидрофобность. Сильные водоотталкивающие свойства обусловлены совокупным эффектом микро/наношероховатости поверхности, обеспечиваемой слоем ZSF, и сниженной SFE от гидрофобного FOTS, что способствует образованию воздушных карманов под каплями воды. Значения угла контакта составили 160◦, 165◦, 49◦, и 151◦на воде, глицерине, н-гексане и этиленгликоле, а углы скольжения 3◦, 1◦, >60◦ (указывает на отсутствие скольжения даже на пределе прибора), и 5◦.

В результате исследования композитного покрытия из жидкого металла [8], получили, что углы контакта с водой F-SiO2c, FLM-1c, FLM-2c, FLM-3c и LMc были 132,7±1.1◦, 136,4±1.3◦, 150.2±2.0◦, 138,4±1.7◦и 97,2±0.9◦. Несколько наночастиц FLM-1c на поверхности способствовали определенной гидрофобности, в то время как избыток наночастиц FLM-3c на поверхности снижал гидрофобность. Только FLM-2c проявлял супергидрофобные свойства. Наночастицы FLM обеспечивали наноструктуры, в то время как шлифованная пластина PTFE обеспечивала микронные структуры. Было изучено влияние пластины PTFE с различной шероховатостью на гидрофобность. Поверхности покрытия, обработанные шлифованной пластиной PTFE, показали краевые углы смачивания водой 123,3±1.7◦, 128.1±2.9◦, 142,9±1.6◦, 133,5±1.5◦и 106.0±2.1◦. Поверхности покрытия, обработанные гладкой пластиной PTFE, показали углы контакта с водой 109,5±2.1◦, 115.0±1.5◦, 117,8± 1.6◦, 112,9±1.4◦и 110,6±2.0◦. Для фторированных покрытий увеличение шероховатости положительно коррелировало с увеличением гидрофобности, а для покрытия LM увеличение шероховатости уменьшало углы контакта с водой.

Заключение

В результате проведенного анализа можно сделать выводы, что покрытие NP-Glide с превосходными антизагрязняющими и долговечными антикоррозионными свойствами подходит для использования в машиностроительной отрасли, к примеру, в эскалаторах или при изготовлении днища кузова автомобиля. Супергидрофобное покрытие ZSF показало хорошую коррозионную стойкость благодаря образованию стабильной границы раздела между твёрдым телом и жидкостью с кавитацией. Данное покрытие можно использовать в судостроении или при изготовлении различных труб, дымоходов и т.д., или при изготовлении сооружений, которые должны выдерживать перепады давления.

Список используемых источников

1. Kechin V., Lyublinski E., Kireev A. The influence of technological factors on electrochemical characteristics of cast magnesium cathodic protective elements.

International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2019. Vol. 8. No. 3. P. 600-612.

2. Cai, G., Hou, J., Jiang, D., & Dong, Z. (2018). Polydopamine-wrapped carbon nanotubes to improve the corrosion barrier of polyurethane coating. RSC Advances, 8(42), 23727–23741. https://doi.org/10.1039/C8RA03267J

3. Chimenti, S., Cerra, M., Zanetta, T., Leiza, J. R., & Paulis, M. (2022). Taking Advantage of Phosphate Functionalized Waterborne Acrylic Binders to Get Rid of Inhibitors in Direct-to-Metal Paints. Polymers, 14(2). https://doi.org/10.3390/POLYM14020316

4. González, E., Stuhr, R., Vega, J. M., García-lecina, E., Grande, H. J., Leiza, J. R., & Paulis, M. (2021). Assessing the effect of CeO2 nanoparticles as corrosion inhibitor in hybrid biobased waterborne acrylic direct to metal coating binders. Polymers, 13(6). https://doi.org/10.3390/POLYM13060848

5. Chen, B., Zhou, C., Xiong, W., Peng, J., Luo, X., Pan, X., & Liu, Y. (2025). Long-lasting anti-corrosion direct-to-metal polyurethane NP-GLIDE coatings based on the coordination effect and dual cross-linking of polyphenol. Journal of Colloid and Interface Science, 678, 742–756. https://doi.org/10.1016/J.JCIS.2024.08.164

6. Cai, G., Hou, J., Jiang, D., & Dong, Z. (2018). Polydopamine-wrapped carbon nanotubes to improve the corrosion barrier of polyurethane coating. RSC Advances, 8(42), 23727–23741. https://doi.org/10.1039/C8RA03267J

7. Chimenti, S., Cerra, M., Zanetta, T., Leiza, J. R., & Paulis, M. (2022). Taking Advantage of Phosphate Functionalized Waterborne Acrylic Binders to Get Rid of Inhibitors in Direct-to-Metal Paints. Polymers, 14(2). https://doi.org/10.3390/POLYM14020316

8. Ji, Z., Huang, X., Sheng, H., & Wang, X. (2024). Cell membrane-inspired self-assembly corrosion resistant liquid metal composite coating with photothermal/electrothermal anti-icing/de-icing performance. Progress in Organic Coatings, 191, 108464. https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2024.108464

УДК 624.042

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ТРУБ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Репин Владимир Анатольевич[1], к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций, **Аминов Михаил Алексеевич**[2], студент, **Ребриков Александр Леонидович**[3], студент

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), [1]repinv@vlsu.ru, [2]aminovmihail5@gmail.com, [3]rebrekov@mail.ru

Аннотация. В статье представлено комплексное исследование прочности и деформативности промышленных железобетонных дымовых труб с учетом влияния эксплуатационных факторов. Проведен анализ типичных дефектов, таких как трещины, коррозия арматуры и отслоение защитного слоя, а также определены причины их возникновения, включая температурные перепады, химическую агрессию и механические нагрузки. На основе визуально-инструментального обследования, лабораторных испытаний и численного моделирования в программном комплексе ЛИРА-САПР выявлены критические зоны конструкций, наиболее подверженные разрушению. Особое внимание уделено влиянию температурных нагрузок, которые составляют до 60% причин дефектов. Разработана методика оценки технического состояния труб, включающая современные методы диагностики, такие как ультразвуковая диагностика, тепловизионный контроль и лазерное сканирование. Предложены технологии ремонта и усиления конструкций, включая инъектирование трещин, торкретирование и применение углеволоконных обойм (CFRP). Проведен технико-экономический анализ ремонтных работ, подтверждающий целесообразность использования современных материалов. Результаты исследования имеют практическую ценность для проектирования, эксплуатации и восстановления дымовых труб, способствуя повышению их долговечности и безопасности.

Ключевые слова: дымовые трубы, железобетонные конструкции, дефекты, температурные воздействия, коррозия арматуры, ремонтные технологии, техническое состояние.

STRENGTH AND DEFORMABILITY OF INDUSTRIAL REINFORCED CONCRETE PIPES DEPENDING ON OPERATING CONDITIONS

Repin Vladimir Anatolyevich[1], Ph.D., Associate Professor of the Department of Building Constructions, **Aminov Mikhail Alekseevich**[2], student, **Rebrikov Alexander Leonidovich**[3], student

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), [1]repinv@vlsu.ru, [2]aminovm@mail.ru, [3]rebrekov@mail.ru

Abstract. The article presents a comprehensive study of the strength and deformability of industrial reinforced concrete chimneys, considering the influence of operating conditions. The analysis identifies typical defects, such as cracks, reinforcement corrosion, and protective layer delamination, and determines their causes, including thermal fluctuations, chemical aggression, and mechanical loads. Based on visual-instrumental surveys, laboratory tests, and numerical modeling in the LIRA-SAPR software, critical zones prone to failure were identified. Special attention is given to thermal loads, which account for up to 60% of defect causes. A methodology for assessing the technical condition of chimneys was developed, incorporating advanced diagnostic methods such as ultrasonic testing, thermal imaging, and laser scanning. Repair and reinforcement technologies, including crack injection, shotcreting, and the use of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) wraps, are proposed. A technical-economic analysis of repair works confirms the feasibility of using modern materials. The research results are of practical value for the design, operation, and restoration of chimneys, contributing to their durability and safety.
Keywords: chimneys, reinforced concrete structures, defects, thermal effects, reinforcement corrosion, repair technologies, technical condition.

Введение

Промышленные железобетонные дымовые трубы являются ключевыми элементами инфраструктуры предприятий тяжелой промышленности, обеспечивая отвод продуктов горения и снижение концентрации вредных выбросов в атмосферу. Эти сооружения подвергаются сложным эксплуатационным воздействиям, включая высокие температуры, агрессивные газовые среды (SO_2, HCl), ветровые и сейсмические нагрузки, а также атмосферные осадки [1]. Со временем такие факторы приводят к накоплению дефектов, таких как трещины, коррозия арматуры, отслоение защитного слоя бетона и деформации ствола [2]. Многие трубы, построенные в период с 1940-х по 1960-е годы, находятся в аварийном состоянии из-за физического износа и ужесточения экологических требований, что создает значительные риски для промышленной и экологической безопасности [3].

Целью исследования является разработка комплексной методики оценки технического состояния промышленных железобетонных дымовых труб с учетом выявленных дефектов, причин их возникновения и эксплуатационных факторов. Основные задачи включают: систематизацию типичных дефектов и анализ их причин; оценку эффективности современных методов диагностики, таких как визуальный осмотр, ультразвуковая диагностика и лазерное сканирование; разработку рекомендаций по ремонту, усилению и модернизации конструкций; а также проведение технико-экономического анализа ремонтных мероприятий [4]. Объектом исследования являются ствол и фундамент железобетонных труб. Практическая ценность работы заключается в возможности применения полученных результатов для проектирования новых труб, ремонта существующих сооружений и продления их эксплуатационного ресурса, что способствует повышению безопасности и снижению экологических рисков [5].

Методы

Для анализа прочности и деформативности железобетонных дымовых труб применялся комплексный подход, включающий визуально-инструментальное обследование, лабораторные испытания и численное моделирование. Визуальное обследование проводилось с использованием биноклей, беспилотных летательных аппаратов с камерами высокого разрешения и тепловизоров для выявления видимых дефектов, таких как трещины, сколы, коррозия арматуры и деформации ствола (рис. 1) [6]. Для высоких труб применялись методы промышленного альпинизма, что позволило детально осмотреть труднодоступные участки. Все дефекты фиксировались в дефектных ведомостях с указанием их расположения, размеров и вероятных причин возникновения.

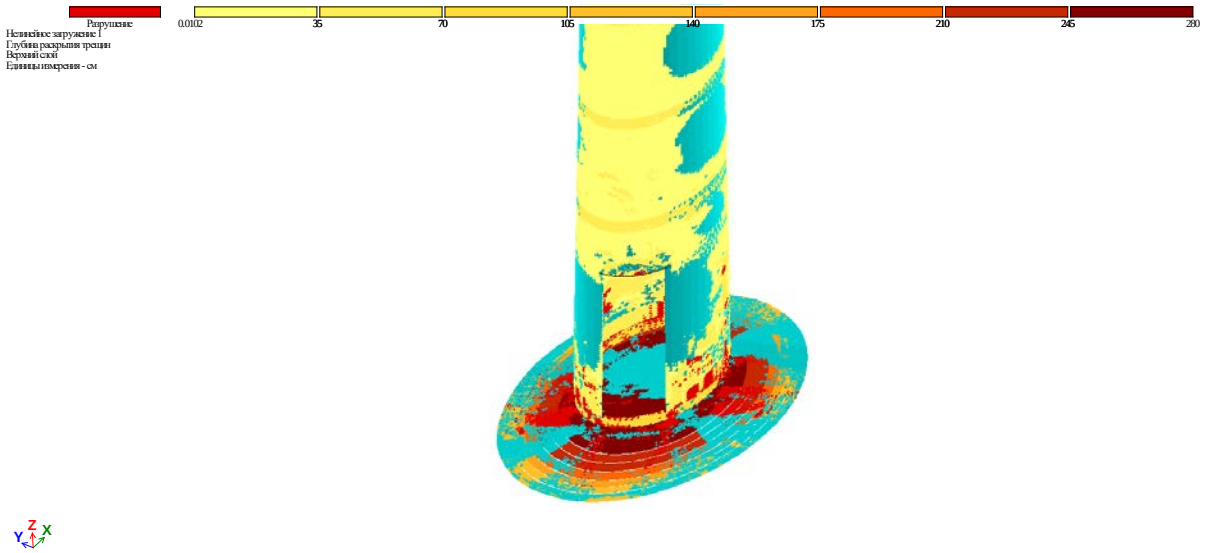


Рис. 1. Разрушение элемента при кратковременном нагружении

Инструментальные методы включали ультразвуковую диагностику для определения прочности бетона и выявления внутренних дефектов, тепловизионный контроль для обнаружения зон повышенной влажности и скрытых пустот, а также лазерное сканирование для построения точных 3D-моделей конструкций [7]. Магнитометрические приборы использовались для измерения толщины защитного слоя бетона. Лабораторные испытания предусматривали отбор кернов для определения прочности бетона на сжатие, анализ карбонизации с использованием фенолфталеинового метода и химический анализ агрессивных отложений (SO_2, хлориды, нитраты). Для оценки коррозии арматуры применялись потенциометрические методы и электромагнитная индукция.

Численное моделирование проводилось в программном комплексе ЛИРА-САПР с использованием метода конечных элементов. Модель учитывала фактические физико-механические характеристики материалов, полученные в результате лабораторных испытаний, а также эксплуатационные нагрузки, включая температурные перепады, ветровые воздействия и химическую агрессию. Это позволило определить напряженно-деформированное состояние конструкций и выявить критические зоны, наиболее подверженные разрушению.

Результаты и обсуждение

Проведенное исследование показало, что основное влияние на прочность и деформативность железобетонных дымовых труб оказывают температурные воздействия, которые вызывают до 60% всех дефектов. Вертикальные и горизонтальные трещины, обусловленные температурными напряжениями и усадкой бетона, составляют 45–60% случаев, а коррозия арматуры, вызванная воздействием агрессивных газов и конденсата, — 20–30% (рис. 2). Отслоение защитного слоя бетона, карбонизация и деформации ствола также являются распространенными дефектами, особенно в трубах с кирпичной футеровкой и недостаточной гидроизоляцией.

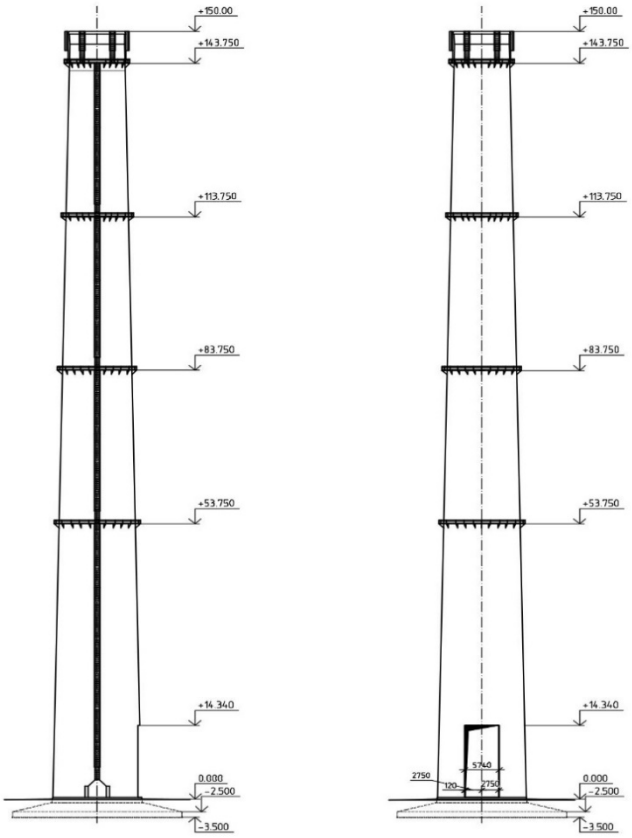


Рис. 2. Общий вид ствола трубы

Численное моделирование в ЛИРА-САПР выявило, что критические зоны напряжений располагаются в основании ствола, где температурные перепады и неравномерная осадка фундамента вызывают максимальные деформации, а также вблизи температурных швов, где наблюдается концентрация трещин [8]. Для оценки фактической прочности бетона были проведены испытания ствола и фундамента (табл. 1, табл. 2). Средняя прочность бетона ствола составила 45,68 МПа (класс В20), а фундамента — 56,16 МПа (класс В30), что указывает на снижение прочностных характеристик по сравнению с проектными значениями (В22,5) [9].

Таблица 1. Результаты испытания прочности бетона ж/б труб

Наименование конструкций, проектный класс прочности бетона	**№ участка**	**Усилие вырыва анкерного устройства, кН**	**Прочность бетона, МПа**		**Фактический класс бетона, Вф**
			участка	**средняя**	
Ствол ж/б трубы (В 22,5)	1	34,37	58,43	45,68	В20
	2	30,58	51,99		
	3	22,72	38,63		
	4	28,99	49,29		
	5	35,18	40,15		
	6	20,93	35,58		

Таблица 2. Результаты испытания прочности фундамента ж/б трубы

Наименование конструкций, проектный класс прочности бетона	**№ участка**	**Усилие вырыва анкерного устройства, кН**	**Прочность бетона, МПа**		**Фактический класс бетона, Вф**
			участка	**средняя**	
Фундамент ж/б трубы (В 22,5)	1	39,75	67,57	56,16	В30
	2	29,96	50,92		
	3	36,51	62,07		
	4	35,57	60,47		
	5	35,38	60,14		
	6	34,59	58,80		
	7	24,06	40,91		
	8	37,23	63,29		
	9	24,30	41,30		

Для устранения дефектов разработаны технологии ремонта. Волосяные трещины шириной до 0,3 мм устраняются нанесением гидрофобизирующих составов и эластичных герметиков. Трещины средней величины (0,3–1,0 мм) ремонтируются путем инъектирования эпоксидными или полиуретановыми составами под давлением, что обеспечивает заполнение пустот и восстановление целостности конструкции. Сквозные трещины шириной более 1 мм требуют комплексного подхода, включающего инъектирование, усиление углеволоконными обоймами (CFRP) и торкретирование высокопрочными бетонными смесями (рис. 3).



Рис. 3. Пример выполнения железобетонной обоймы

Восстановление защитного слоя бетона выполняется методом торкретирования, при котором ремонтные составы наносятся под давлением, создавая слой толщиной 30–50 мм. Для участков с оголенной арматурой проводится механическая очистка от коррозии и нанесение антикоррозионных составов. Замена футеровки осуществляется с использованием огнеупорного кирпича или торкретбетона, что повышает устойчивость к термическим и химическим воздействиям. Контроль качества ремонта включает визуальный осмотр, ультразвуковую дефектоскопию и испытания на адгезию материалов.

Технико-экономический анализ ремонтных работ показал, что локальный ремонт трещин обходится в 0,5–3 тыс. руб./м², усиление композитными обоймами — в 8–15 тыс. руб./м², а полная замена футеровки — в 10–20 тыс. руб./м² (табл. 3) [10]. Эти затраты варьируются в зависимости от высоты трубы, степени повреждений и используемых материалов.

Таблица 3. Ориентировочная стоимость работ по ремонту ж/б дымовых труб

Вид работ	**Цена (тыс. руб.)**	**Примечания**
Обследование и диагностика	50–3000	Зависит от высоты и методов (ультразвук, термография)
Локальный ремонт трещин	0,5–3 за м²	Инъектирование эпоксидными составами
Восстановление защитного слоя	3–6 за м²	Торкретирование
Усиление конструкции	8–15 за м²	Углеволоконные обоймы (CFRP)
Замена футеровки	10–20 за м²	С учетом огнеупорных материалов

Для повышения долговечности труб рекомендуется регулярное техническое обследование не реже одного раза в год, включающее визуальный осмотр, тепловизионную диагностику и геодезические измерения. Применение современных материалов, таких как углеволоконные композиты и термостойкие покрытия, позволяет продлить срок службы конструкций на 15–25 лет [11].

Выводы

Проведенное исследование позволило разработать комплексную методику оценки технического состояния промышленных железобетонных дымовых труб, учитывающую влияние эксплуатационных факторов. Температурные нагрузки и химическая агрессия являются основными причинами дефектов, таких как трещины (45–60% случаев) и коррозия арматуры (20–30%). Комплексные методы диагностики, включая визуальный осмотр, ультразвуковую диагностику, тепловизионный контроль и лазерное сканирование, обеспечивают точную оценку состояния конструкций. Численное моделирование в ЛИРА-САПР подтвердило, что критические зоны расположены в основании ствола и вблизи температурных швов. Разработанные технологии ремонта, такие как инъектирование трещин, торкретирование и усиление углеволоконными обоймами, позволяют эффективно устранять дефекты и восстанавливать несущую способность.

Технико-экономический анализ подтвердил целесообразность применения современных материалов, которые снижают затраты на эксплуатацию и продлевают срок службы труб.

Перспективы дальнейших исследований включают разработку автоматизированных систем мониторинга с использованием цифровых двойников, которые интегрируют данные лазерного сканирования, термографии и акустической эмиссии. Также планируется расширение методик оценки остаточного ресурса с учетом усталостного износа материалов и разработка типовых решений для усиления конструкций с учетом специфики производственных процессов.

Список литературы

1. Дудочкин И.Б., Овчинников Я.В., Кухта М.В., Шишкина Е.А., Зарипова Г.У. Технологии строительства дымовых промышленных труб // Технические науки — от теории к практике. 2015. № 45. С. 93–99.

2. Зулкарнаев Г.С., Мелентьев А.С., Гафиятуллина Н.М. Конструктивные решения железобетонных промышленных газоотводящих труб // Молодой ученый. 2016. № 10 (114). С. 208–213.

3. Сапов Ю., Павлов В., Корнеев И. Классификация и основные элементы промышленных дымовых труб // ТехНадзор. 2015. №12(109). С.364-365.

4. Бабушкин Р.А., Гмызов Д.С., Иванов Ю.П. Тепловизионная диагностика дымовых труб // Инновационная наука. 2015. № 9 (9). С. 52–57.

5. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.

6. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений.

7. СП 375.1325800.2023. Трубы промышленные дымовые. Правила проектирования.

8. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*.

9. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.

10. Лисятников М.С., Чибрикин Д.А., Прусов Е.С. [и др.]. Прочностные характеристики полимерных композиционных материалов для строительных конструкций // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2025. №2(794). С. 140-143.

11. Мясников Д. О. Этапы блочно-модульного проектирования объектов // Строительство. Архитектура. Дизайн: Материалы Пятой Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. 2024. С. 140-143.

УДК 624.014

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭСТАКАД

Репин Владимир Анатольевич, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций, **Репин Александр Владимирович,** студент, **Плотников Антон Николаевич**, студент

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), repinv@vlsu.ru, plotnikov@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются современные методы диагностики технического состояния промышленных эстакад, эксплуатируемых в условиях агрессивной среды и высоких нагрузок. На основе обследований эстакад ПАО «НЛМК» проанализированы традиционные и инновационные подходы, включая визуальный осмотр, лазерное сканирование, акустическую эмиссию и термографию. Выполнены поверочные расчеты в ПК «ЛИРА-САПР», позволившие оценить прочность и деформативность конструкций. Установлено, что комплексное применение современных технологий повышает точность диагностики до ±10% и снижает затраты на ремонт на 25–35%. Предложены рекомендации по внедрению цифровых паспортов и адаптивных систем мониторинга для оптимизации эксплуатации.
Ключевые слова: промышленные эстакады, диагностика, лазерное сканирование, акустическая эмиссия, цифровое моделирование, техническое состояние.

MODERN METHODS FOR DIAGNOSING THE TECHNICAL CONDITION OF INDUSTRIAL PIPE RACKS

Repin Vladimir Anatolyevich, Ph.D., Associate Professor of the Department of Building Constructions, **Repin Alexander Vladimirovich**, student, **Plotnikov Anton Nikolaevich**, student

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), repinv@vlsu.ru, plotnikov@mail.ru

Abstract. The article examines modern methods for diagnosing the technical condition of industrial pipe racks operated under aggressive environments and high loads. Based on inspections of pipe racks at PJSC “NLMK,” traditional and innovative approaches, including visual inspection, laser scanning, acoustic

emission, and thermography, were analyzed. Verification calculations in the LIRA-SAPR software were performed to assess the strength and deformability of structures. It was found that the integrated use of modern technologies increases diagnostic accuracy to ±10% and reduces repair costs by 25–35%. Recommendations are proposed for implementing digital passports and adaptive monitoring systems to optimize operation.
Keywords: industrial pipe racks, diagnostics, laser scanning, acoustic emission, digital modeling, technical condition.

Введение

Промышленные эстакады для коммуникаций являются критически важными сооружениями на предприятиях металлургической, нефтегазовой и химической промышленности. По данным Ростехнадзора, около 35% таких конструкций в России эксплуатируются сверх нормативного срока, что увеличивает риск аварий из-за накопления дефектов [1]. В этой связи вопросы прогнозирования остаточного ресурса [2–5] и разработки эффективных методов диагностики их технического состояния приобретают первостепенное значение для обеспечения безопасности и оптимизации эксплуатационных затрат. Актуальность задачи усиливается необходимостью применения современных информационных технологий для содержания сложных инженерных объектов [9] и методологии оценки их остаточного ресурса [10]. Кроме того, важным аспектом является анализ работы конструкций в составе пространственного каркаса [12], а также использование новых материалов для восстановления и усиления [6, 7, 11]. Разработка эффективных методов диагностики их технического состояния необходима для обеспечения безопасности и оптимизации эксплуатационных затрат.

В статье представлены результаты обследования двух эстакад ПАО «НЛМК», выполненного с использованием традиционных и современных методов диагностики, а также поверочных расчетов в ПК «ЛИРА-САПР».

Методы

Обследование эстакад тепломагистрали 3 ТЭЦ и «Конвертерная» проводилось в три этапа: подготовка (анализ проектной документации), визуальное обследование с фотофиксацией дефектов и инструментальное обследование с применением современных технологий. Использовались лазерный дальномер RGK, ультразвуковой толщиномер А1209, тепловизор Testo 871 и тахеометр Leica FlexLine TS07. Все приборы сертифицированы в соответствии с ГОСТ Р 58941-2020, ГОСТ Р 58939-2020 и ГОСТ Р 58945-2020. Лабораторные испытания включали анализ марок стали и прочности бетона. Поверочные расчеты выполнялись в ПК «ЛИРА-САПР» с учетом постоянных, длительных и кратковременных нагрузок (табл. 1). Для расчета фундаментов применялся модуль «ФУНДАМЕНТ 14.0» согласно СП 24.13330.2021.

Таблица 1. Нормативные и расчетные длительные нагрузки на трубопроводы эстакады «Конвертерная»

№	Наименование	Нормативная нагрузка, кгс/м	Коэффициент надежности	Расчетная нагрузка, кгс/м
1	Трубопровод воздуха (сухой) Ø630х10	69,93	1,2	83,9
2	Трубопровод воздуха (сырой) Ø630х10, изоляция 110 мм	94,35	1,2	113,2
3	Трубопровод пара Ø530х8, изоляция 190 мм	101	1,2	121,2
4	Трубопровод сжатого воздуха Ø530х10, изоляция 110 мм	83,3	1,2	100
5	Трубопровод теплосети Ø530х8, изоляция 140 мм	89,9	1,2	107,9

Результаты и обсуждение

Обследование выявило основные типы дефектов: коррозия металла (58–63%), трещины в бетоне (25–30%), деформации конструкций (15–20%) и разрушение соединений (22–26%) (рис. 1). Коррозия преобладает из-за агрессивной среды и отсутствия качественной антикоррозионной защиты. Трещины в бетоне связаны с температурными воздействиями и вибрацией.



Рис. 1. Распределение дефектов промышленных эстакад

Таблица 2. Статистический анализ дефектов эстакад

Категория дефектов	Частота, %	Средняя стоимость устранения, тыс. руб/п.м.
Коррозионные повреждения	58–63	350–420
Трещинообразование	25–30	700–800
Деформации конструкций	15–20	1100–1300
Разрушение соединений	22–26	650–720

Лазерное сканирование позволило создать точные 3D-модели эстакад (рис. 2), обеспечив выявление деформаций с точностью до 1–2 мм. Акустическая эмиссия обнаружила микротрещины на ранних стадиях, а термография выявила скрытые дефекты в защитных покрытиях. Поверочные расчеты в ПК «ЛИРА-САПР» показали, что несущая способность конструкций в основном соответствует нормам, но отдельные узлы требуют усиления (рис. 3).

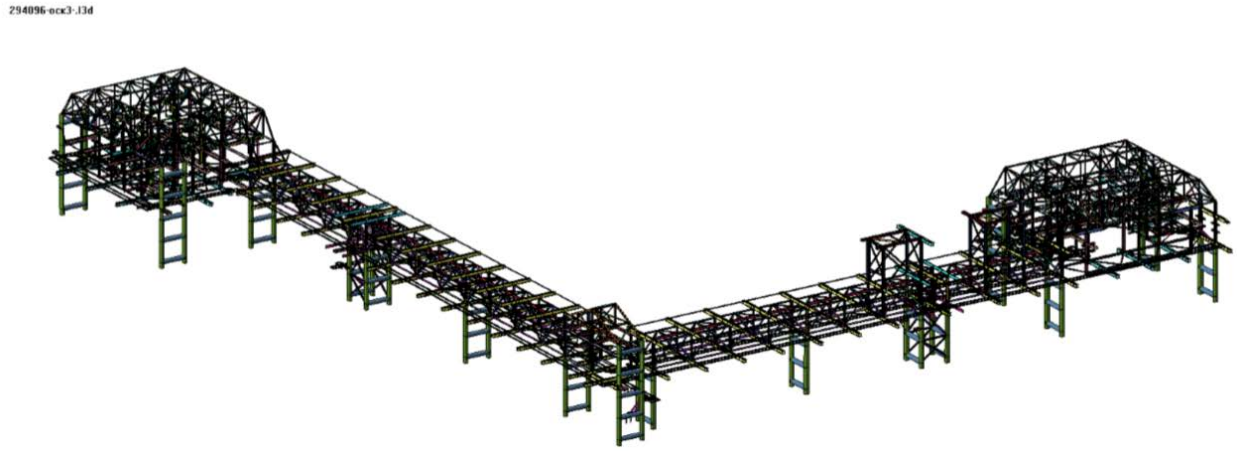


Рис. 2. Трехмерная модель расчетной схемы эстакады «Конвертерная»

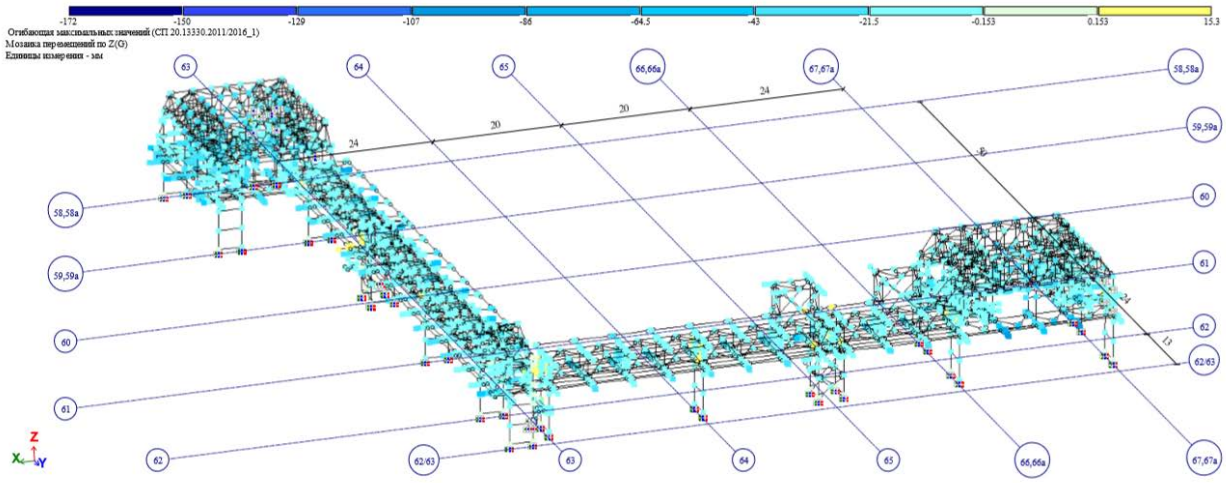


Рис. 3. Мозаика перемещений по оси Z, мм (РСН, MAX)

Экономический анализ показал, что комплексное обследование с использованием современных методов (1,2–1,5 млн руб.) окупается за счет сокращения ремонтных затрат на 25–35% и снижения риска аварий в 4–6 раз по сравнению с традиционными методами (табл. 3).

Таблица 3. Сравнение экономической эффективности методов обследования

Показатель	Традиционный метод	Предлагаемая методика	Преимущество
Периодичность обследований	Ежегодно	1 раз в 3 года	Снижение частоты в 3 раза
Средняя стоимость цикла за 3 года	900–1200 тыс. руб.	1200–1500 тыс. руб.	Экономия 300–900 тыс. руб.
Точность оценки ресурса	±40%	±10%	Снижение рисков
Затраты на ремонт	2,8–3,5 млн руб.	1,5–2,0 млн руб.	Экономия 1,3–1,5 млн руб.
Вероятность аварий	18–22%	3–5%	Снижение в 4–6 раз

Выводы

Комплексное применение современных методов диагностики (лазерное сканирование, акустическая эмиссия, термография) и цифрового моделирования в ПК «ЛИРА-САПР» позволяет повысить точность оценки технического состояния эстакад до ±10%. Предложенные рекомендации включают внедрение цифровых паспортов и адаптивных систем мониторинга, что сокращает частоту обследований в 3 раза и снижает затраты на ремонт на 25–35%. Экономический эффект за 10 лет составляет 8–12 млн рублей на 100 м эстакады за счет предотвращения аварий и оптимизации ремонтных работ. Перспективы включают разработку автоматизированных систем мониторинга и технологий цифровых двойников для прогнозирования дефектов.

Список использованной литературы

1. Соколов В.А. О прогнозировании остаточного ресурса строительных конструкций // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2017. Т. 284. С. 19–23.

2. Корольков Д.И. Оценка остаточного ресурса строительных конструкций: монография. СПбГАСУ, 2020. 168 с.

3. Псюк В.В., Голоднов А.И., Никишина И.А., Псюк М.Ю. Оценка технического состояния и расчет остаточного ресурса строительных конструкций // Сб. науч. трудов Донбасского государственного технического университета. 2015. №45. С. 67–73.

4. Валиуллин Д.А., Надрышина А.Р., Майстренко И.Ю., Зиннуров Т.А., Майстренко Т.И. Оценка остаточного ресурса стальной конструкции // Известия КазГАСУ. 2016. №4 (38). 9 с.

5. Черняев А.И., Трефилов В.А. Оценка надежности и долговечности металлоконструкций // Молодой ученый. 2013. №10 (57). С. 225–228.

6. Пронозин Я.А., Епифанцева Л.Р., Волосюк Д.В., Горская Я.В. Технология ремонтных и восстановительных работ. М.: АСВ, 2016. 148 с.
7. Белов А.И., Габитов А.И., Знаменский В.В. Восстановление и усиление оснований и строительных конструкций. М.: АСВ, 2017. 924 с.
8. Кузнецов В.С. Железобетонные и каменные конструкции. М.: АСВ, 2014. 304 с.
9. Бокарев С.А., Прибытков С.С., Яшнов А.Н. Содержание искусственных сооружений с использованием информационных технологий. М.: УМЦ ЖДТ, 2018.
10. Пермяков М.Б. Методология расчета и оценки остаточного ресурса зданий и сооружений // Наука и безопасность. 2013. №2 (7). С. 38–42.
11. Лисятников М.С., Чибрикин Д.А., Прусов Е.С. Прочностные характеристики полимерных композиционных материалов для строительных конструкций // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2025. – № 2(794). – С. 139-150.
12. Рощина С.И., Медведев Е.К., Гоньшаков А.Г, Гоньшаков Н.Г. Анализ расчётных длин железобетонных колонн в составе пространственной рамы производственного одноэтажного здания // Международная конференция по физике материалов, строительным конструкциям и технологиям в строительстве, промышленной и производственной инженерии (MPCPE-2024) : сборник трудов V международной научно-технической конференции, Владимир, 23–25 апреля 2024 года. – Владимир: АРКАИМ, 2024. – С. 122-130.

УДК 69.059

КОМПЛЕКСНЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Римшин Владимир Иванович [1], д.т.н., профессор,
Кецко Екатерина Сергеевна [2], аспирант, **Кузина Ирина Сергеевна** [1], магистрант

[1] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ) (г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 129337, Россия), v.rimshin@niisf.ru, ms.kuzina01@mail.ru
[2] Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН) (г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21, 127238, Россия), kkuzzina@mail.ru

Аннотация. Рассматриваемый в данной статье объект представляет собой трехэтажное здание производственного назначения с подвалом и пристройками. Целью технического обследования, рассмотренного в данной статье, являлось определение конструктивной схемы здания, его технического состояния, общей несущей способности конструкций, получение сведений о состоянии несущих и ограждающих строительных конструкций здания, выявление и фиксация существующих дефектов для оценки их возможного влияния на строительные конструкции в процессе дальнейшей эксплуатации здания. Также были выполнены расчёты несущей способности плит покрытия и перекрытия, балок. По их результатам установлено, что несущая способность конструкций обеспечена. Результатом являлось определение состояния конструкций и здания в целом и разработка рекомендаций по обеспечению нормальной дальнейшей эксплуатации здания и рекомендаций по усилению конструкций.
Ключевые слова: инженерно-техническое обследование, производственное здание, поверочный расчёт, усиление конструкций

COMPREHENSIVE TECHNICAL CONDITION CONTROL OF AN INDUSTRIAL BUILDING

Rimshin Vladimir Ivanovich [1], D.Sc., Prof., **Ketsko Ekaterina Sergeevna** [2], postgraduate student, **Kuzina Irina Sergeevna** [1], master

[1] Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)», 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russia, v.rimshin@niisf.ru, ms.kuzina01@mail.ru

[2] Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN), 127238, Moscow, Lokomotivny p., 21, Russia, kkuzzina@mail.ru

Abstract. The object considered in this article is a three-story industrial building with a basement and extensions. The technical survey purpose considered in this article was to determine the structural building scheme, its technical condition, the structures overall load-bearing capacity, obtain information on the the load-bearing and enclosing building structures condition, identify existing defects to assess their possible impact on the building structures during further building operation. The load-bearing capacity calculations of the roof and floor slabs, beams were also performed. It was established that the structures load-bearing capacity is ensured based on the calculations results. The purposes were to determine the structures condition and the building as a whole and develop recommendations to ensure normal further building operation and recommendations for strengthening the structures.

Keywords: engineering and technical survey, industrial building, verification calculation, structural reinforcement.

Введение

Рассматриваемый в данной статье объект представляет собой трехэтажное здание производственного назначения с подвалом и пристройками, размерами в плане: машинный зал – 20,0×9,6 м, пятиэтажная часть – 6,5×9,6 м, трёхэтажная часть – 17,8×3,6 м. Уровень ответственности здания высокий. Здание возведено по индивидуальному проекту. Целью технического обследования, рассмотренного в данной статье, являлось определение конструктивной схемы здания, его технического состояния, общей несущей способности конструкций, получение сведений о состоянии несущих и ограждающих строительных конструкций здания, выявление и фиксация существующих дефектов для оценки их возможного влияния на строительные конструкции в процессе дальнейшей эксплуатации здания.

Методика проведения обследования

Техническое обследование здания, рассмотренного в данной статье, выполнялось поэтапно: ознакомление с объектом обследования, его объемно–планировочным и конструктивным решениями, предварительное обследование: ознакомление с имеющейся документацией, общий осмотр объекта, сплошное визуальное обследование строительных конструкций, выявление дефектов и повреждений по внешним признакам с необходимыми замерами и фиксацией, обмерные работы инженерных коммуникаций, обследования инженерных сетей, теплотехнический расчёт ограждающих конструкций, выборочное обследование: измерение прочностных характеристик материалов несущих конструкций; устройство шурфов, работы по обмеру необходимых геометрических параметров строительных конструкций, элементов, узлов и фундаментов, инструментальное определение параметров дефектов и выполнение поверочных расчетов, анализ результатов обследования, выполнение расчетов с определением несущей способности элементов конструкции здания, составление технического отчета с выводами по результатам обследования, подготовка рекомендаций для обеспечения дальнейшей нормальной эксплуатации здания. Для определения прочностных характеристик строительных материалов использовался прибор Оникс 2.6. Тахеометрическая съёмка конструкций выполнена тахеометром Trimble M3 (5") [1-3].

В ходе проводившегося обследования установлено, что фундаменты наружных и внутренних несущих стен здания ленточные, колонн – столбчатые. Конструктивный материал фундаментов – железобетон. Согласно данным проходки шурфа, глубина заложения подошвы фундаментов несущих стен здания, от уровня земли составляет ≈4,00 м (относительная отметка – 5,850 м). Ширина подошвы обследованных ленточных фундаментов составляет 0,85 м. Прочность бетона ленточных и столбчатых фундаментов

соответствует марке бетона В15. В ходе освидетельствования конструкций фундаментов в открытых шурфах гидроизоляция фундаментных конструкций нарушена или частично нарушена. При обследовании фундаментов и грунтов основания были обнаружены повреждения и отдельные места отсутствия гидроизоляции и следы намокания (увлажнения) фундаментов. Результаты проведенного обследования фундаментов и грунтов основания показали, что состояние опорного контура (фундаменты и грунты основания) работоспособное.

Несущие наружные стены в осях Л'–М'–10/4–10/1 монолитные железобетонные облицованные снаружи здания кирпичной кладкой. В осях Л'–М'–10/1–11 до отметки +2,100 стены монолитные железобетонные, выше кирпичные с облицовкой керамическим кирпичом, которая возводилась одновременно с бетонированием стен и использовалась как опалубка. Стены здания в осях Л'–М'–10/1–11 выше отметки +2,10 выполнены из красного глиняного (обыкновенного) кирпича на цементно–песчаном растворе. Наружная верста надземной части кладки выполнена из облицовочного щелевого керамического кирпича с расшивкой швов. Цокольная часть здания выполнены с расшивкой швов. Кладка наружных стен здания выполнена с расшивкой швов. Со стороны помещений стены оштукатурены и окрашены. Система перевязки кладки цепная. При обследовании стен и перегородок здания обнаружены трещины штукатурного слоя осадочного характера, выветривание раствора и камней кирпичных стен фасадов здания, нарушение штукатурного и окрасочного слоя стен со стороны помещений, сетка трещин по штукатурному покрытию наружных стен в помещениях. Прочность керамического кирпича на неповрежденных намоканием/размораживанием участках стен на сжатие в основном соответствует марке не ниже М100, раствор не ниже М50. Наружные и внутренние стены здания находятся в ограниченно–работоспособном состоянии, перегородки здания находятся в работоспособном состоянии.

Перекрытия в осях Л'–М'–10/4–10/1, а также в осях Л'–М'–10/1–11 на отметке –1,500 и отметке +2,100 – монолитные железобетонные. Другие перекрытия выполнены из сборных железобетонных плит, опирающихся на стены и стальные балки. В конструкции сборного железобетонного настила покрытий применены сборные железобетонные балочные плиты, выполненные пустотными, плоскими. Плиты имеют размеры 5760×1190×220 (h) мм. Плиты имеют круглые пустоты диаметром 140 мм. Плиты, предусмотренные проектом для устройства покрытия, приняты по типовой унифицированной серии РС5151 и имеют маркировку НВ–58–12. У сборных пустотных плит в местах выборочных вскрытий выявлено рабочее армирование стержнями стальной арматуры диаметром 12 и 14 мм, класса А500. Защитный слой бетона для такой арматуры в минимальном значении фактической величины составляет 16 мм, в среднем – 17 мм, что должно обеспечивать сохранность арматурной стали от воздействия коррозионных процессов. Контроль фактической прочности на сжатие бетона монолитных

конструкции перекрытий проводился приборами неразрушающего контроля. Результаты испытаний показывают, что фактическая прочность на сжатие бетона монолитных перекрытий варьируется в пределах 28÷35 МПа. Фактическая средняя прочность на сжатие бетона, по результату испытаний составляет 32,1 МПа, что соответствует марке М327 и условному классу бетона В25. Прочность бетона сборных плит перекрытий, полученную методами неразрушающего контроля качества строительства, по результатам настоящего обследования и последующей статистической обработки, следует принять 34,03 МПа, соответствующей классу бетона по прочности на сжатие В26,5. Полученные прочности бетона железобетонных плит не ниже прочности по марке М–200. Прочность бетона плит покрытия, полученная методами неразрушающего контроля качества строительства, по результатам настоящего обследования и последующей статистической обработки, следует принять: для ребристых плит в пролёте Б–В – 19,26 МПа, соответствующей классу бетона по прочности на сжатие В15; для сборных железобетонных плит – 34,03 МПа, соответствующей классу бетона по прочности на сжатие В26,6.

При обследовании перекрытий выявлены трещины шириной раскрытия до 5,0 мм и локальные участки на устьях швов между плитами перекрытия с выпадением цементно–песчаного раствора появившиеся вследствие неравномерной осадки здания; железобетонный настил пандуса у оси 11, подвержен воздействию атмосферных осадков, поэтому помещение под ним получило протечки в швах между плитами. Вода, попадает в пустоты плит и замерзает, что при превращении её в лед, вследствие процессов расширения способствует образованию трещин в бетоне плит вдоль пустот; участки со следами высолов, протечек, шелушения окрасочного покрытия и сеткой трещин на штукатурном покрытии потолков помещений; участки с разрушением, отслоением от основания, плиточного покрытия полов в помещениях (в основном на площадках лестничной клетки), разрывы и истёртости пластикатного и линолеумного покрытия. Несущие элементы перекрытия, покрытия находятся в работоспособном состоянии.

Крыша здания выполнена совмещённой утеплённой, с мягкой рулонной кровлей. Водоотвод с кровли неорганизованный. При обследовании кровли обнаружены отдельные повреждения гидроизоляционного ковра кровли, отсутствие организованного водостока с поверхности кровли. Парапет отсутствует. Кровля здания находится в работоспособном состоянии.

Оценка прочности стен производилась неразрушающим экспресс–методом ударного импульса с помощью прибора «Beton PRO Condtrol» в соответствии с ГОСТ 22690–88. Прочность материала определялась по установленным в программном устройстве прибора градуировочным зависимостям, которые позволяют определять прочность в зависимости от типа контролируемого изделия, от вида материала, от вида бетона и крупного заполнителя, от предполагаемого возраста контролируемого бетона, от вида термической обработки бетона [4-6].

Поверочные расчеты. Нагрузка от собственного веса совмещённой кровли

Сбор нагрузок выполнен в таблице 1.

Таблица 1. Сбор нагрузок от покрытия

№ п/п	Нагрузка	Нормативная нагрузка, кг/м^2	Коэффициент надёжности по нагрузке	Расчётная нагрузка, кг/м^2
1	Гидростеклоизол γ=600 кг/м^3, толщина- 0,020 м	12	1,3	15,6
2	Цементная стяжка γ =1800 кг/м^3, толщина- 0,02 м	36	1,3	46,8

Продолжение таблицы 1

3	Керамзитобетон γ =600 кг/м^3, толщина- 0,140 м	84	1,3	109,2
4	Пароизоляция, обмазка горячим битумом	3	1,3	3,9
			Итого	175,5

Расчётная погонная нагрузка на балки покрытия машинного зала от веса кровли и собственного веса балок:

$$q = \frac{0.538}{9} + 2.6 \cdot 0.44 \cdot 1.4 \cdot 1.1 = 1.82 \frac{\text{т}}{\text{м}} = 18{,}2 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$$

где, расчётный собственный вес балки покрытия (двутавр №40) – 57·9.0·1.05=538 кг, расчётный пролёт балки – 9.0 м, толщина железобетонной плиты – 0.44 м, коэффициент надёжности по нагрузке – 1.1, грузовая площадь на балку от кровли (шаг балок) – 1.4 м.

Расчёт несущей способности стальных балок покрытия машинного зала

Расчет выполнен по СНиП II–23–81*. Сталь: С235.Группа конструкций по таблице 50* СНиП II–23–81* – 4. Коэффициент надежности по ответственности 0,9. Коэффициент условий работы– 1. Закрепления от поперечных смещений и поворотов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Закрепления от поперечных смещений и поворотов

	Слева	Справа
Смещение вдоль Y		Закреплено
Смещение вдоль Z	Закреплено	Закреплено

Поворот вокруг Y	Закреплено	Закреплено
Поворот вокруг Z		Закреплено

Сплошное закрепление сжатого пояса из плоскости изгиба. Сечение. Профиль: Двутавр с уклоном полок по ГОСТ 8239–8940. Загружение 1 – постоянное. Тип нагрузки – равномерно распределённая, 18.2 кН/м. Длина – 9 м. Коэффициент надёжности по нагрузке: 1,1. Пояс, к которому приложена нагрузка: нижний. Загружение 2 – снеговое. Тип нагрузки – равномерно распределённая, 1.79 кН/м. Длина – 9 м. Коэффициент надёжности по нагрузке: 1. Пояс, к которому приложена нагрузка: нижний. Значения опорных реакций приведены в таблице 3. Результаты выполненных расчётов приведены в таблице 4. Коэффициент использования 0.543 – прочность при действии изгибающего момента. Максимальный прогиб – 0.007 м.

Таблица 3. Опорные реакции

	Момент в опоре 1	Сила в опоре 1	Сила в опоре 2	Момент в опоре 2
	кН·м	кН	кН	кН·м
по критерию M_{max}	–110.57	73.71	73.71	–110.56
по критерию M_{min}	–121.44	80.96	80.96	–121.44
по критерию Q_{max}	–121.44	80.96	73.71	–110.56
по критерию Q_{min}	–110.57	73.71	80.96	–121.44

Таблица 4. Результаты расчета

Проверено по СНиП	Проверка	Коэффициент использования
п.5.12	Прочность при действии поперечной силы	0.205
п.5.12	Прочность при действии изгибающего момента	0.543
п.5.15	Устойчивость плоской формы изгиба при действии момента	0.543

Расчёт несущей способности монолитной защитной плиты над машинным залом

Приведенное сечение плиты перекрытия изображено на рисунке 11. Геометрические характеристики сечения. b =100 см. h =44 см. a =3 см. h_0 =41 см. A_s =9.42 см^2 (3Ø20A400). Длина плиты L=1400 мм. Бетон класса B15. R_b = 86.7 кг/см^2. Арматура класса A400. R_s = 3000 кг/см^2. Поверочный расчет по

прочности плиты производится по СНиП 2.03.01–84 «Бетонные и железобетонные конструкции». Расчет прямоугольных сечений изгибаемых элементов должен производиться из условия:

$$M = R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - 0.5 \cdot x) + R_{sc} \cdot A'_s \cdot (h_0 - a') \quad (1)$$

при этом высота сжатой зоны x определяется из условия:

$$R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_s = R_b \cdot b \cdot x \quad (2)$$

$$x = \frac{R_s \cdot A_s}{R_b \cdot b} \quad (3)$$

$$x = \frac{3000 \cdot 9.42}{86.7 \cdot 100} = 3.26 \text{ см}$$

$$M_{max} = R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - 0.5 \cdot x) \quad (4)$$

$M_{max} = 86.7 \cdot 100 \cdot 3.26 \cdot (41 - 0.5 \cdot 3.26)$=1112761.55 кгс·см=109.1 кН·м

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8} \quad (5)$$

$$q = \frac{8 \cdot 1112761.55}{135^2} = 488.46 \text{ кгс/см}=480 \text{ кН/м}$$

Допустимая нагрузка на плиту равна 48845,50 кгс/м^2=0.48 МПа. Расчётный собственный вес железобетонной плиты – 2600кг/м^3×0,44м×1,1=1258 кг/м^2. Расчётная снеговая нагрузка –1.28 кН/м^2. Расчётная нагрузка от кровли – 1.75 кН/м^2. Общая нагрузка – $Q_{факт}$ = 12.58+1.28+1.75=15.61 кН/м^2. $Q_{факт}$ = 15.61 кН/м^2< q=488.45 кН/м^2. Несущая способность монолитной плиты покрытия машинного зала обеспечена.

Выводы

В состав работ по техническому обследованию фундаментов и оснований входило устройство шурфов с составлением обмерных чертежей фундаментов по отрытым шурфам. На их основании выполнены поверочные расчёты оснований фундаментов по II группе предельных состояний (по деформациям). Выполненными расчётами определялись значения расчётных сопротивлений грунтов оснований, проектных давлений по подошвам фундаментов и допустимые нагрузки на фундаменты, исходя из определённых значений расчётных сопротивлений грунтов оснований и габаритных размеров фундаментов [7].

В состав обследования вертикальных и горизонтальных несущих конструкций входило изучение их состояния, включающее выполнение обмерных работ с составлением архитектурных чертежей и чертежей узлов конструкций. Выполнялись выявление и фотофиксация дефектов по внутренним помещениям и по фасадам здания. Также были выполнены расчёты несущей способности плит покрытия и перекрытия, балок. По их результатам установлено, что несущая способность конструкций обеспечена. В ходе технического обследования выполнены работы по определению прочностных характеристик строительных материалов несущих конструкций неразрушающими методами контроля. Класс прочности бетона определялся на основании непосредственных измерений прочности бетона неразрушающими методами [8-10].

На основании полученных результатов обследования для возможной дальнейшей эксплуатации несущих конструкций здания было рекомендовано выполнить новую гидроизоляцию фундаментов, не допускать утечки воды из инженерных коммуникаций здания, рассмотреть вопрос о выполнении комплекса мероприятий по упрочнению оснований фундаментов, отремонтировать отмостку, обеспечив уклон не менее 5%, выполнить вычинку кладки на поврежденных участках стен, восстановить кирпичную кладку с перевязкой с существующей кладкой, заделать швы кладки, выполнить расшивку и заделку имеющихся трещин в кирпичной кладке стены раствором, состоящим из цемента и эмульсии латекса, либо полимерцементным раствором. С целью укрепления кладки стен, а также избавления от трещин, необходимо выполнить инъектирование кирпичной кладки всех проблемных мест в несущих стенах. В железобетонных элементах в местах отслоения защитного слоя бетона провести зачистку арматуры от рыхлых слоев продуктов коррозии, заделать все трещины, после чего восстановить защитный слой бетона и обработать поверхность быстротвердеющими расширяющимися ремонтными составами. Рекомендуется выполнить усиление несущих стен для обеспечения пространственной жесткости, а также своевременно проводить планово–предупредительные ремонты конструкций сооружения. Отделочные покрытия требуют капитального ремонта с полной заменой штукатурки и полной перекраской.

Список использованной литературы

1. Lukin M.V., Roshchina S.I., Lukina A.V., Rimshin V.I. Computer modeling of energy-efficient joints of wood composite panels. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2024. Т. 20. № 1. С. 68-80.

2. Римшин В.И., Рощина С.И., Усанов С.В. Применение информационного моделирования зданий на примере спортивного объекта. Русский инженер. 2024. № 2 (83). С. 44-48.

3. Telichenko V., Rimshin V., Ketsko E. Digital robotic systems for non-destructive reinforced concrete structures testing. E3S Web of Conferences. 2024.

Т. 533. С. 02045.

4. Telichenko V., Rimshin V., Ketsko E. Promising directions for the artificial intelligence development in the housing and utilities sector. E3S Web of Conferences. 2024. Т. 535. С. 05001.

5. Римшин В.И., Анпилов С.М., Рощина С.И., Усанов С.В. Практические подходы к устранению коллизий в информационных моделях зданий. Эксперт: теория и практика. 2024. № 3 (26). С. 87-94.

6. Фехретдинов А.Р., Римшин В.И., Анпилов С.М., Курбатов В.Л. Обследование конструкций образовательных учреждений. В сборнике: Актуальные вопросы развития строительной отрасли, экологической и промышленной безопасности. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Вологда, 2023. С. 235-239.

7. Усов А.С., Лукин М.В., Рощина С.И. Применение искусственного интеллекта в разделе конструктивных решений при проектировании зданий и сооружений. Сборник трудов V Международной научно-технической конференции МРСРЕ-2024. Владимир, 2024. С. 221-229.

8. Рощина С.И., Лукина А.В., Нармания Б.Е., Лисятников М.С., Лукин М.В. Исследование жизненного цикла деревянных покрытий зданий текстильной промышленности. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2024. № 4 (412). С. 201-208.

9. Римшин В.И., Кузина И.С., Кецко Е.С. Обследование конструкций фундаментов и стен общественного здания Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2023. № 1 (15). С. 176-181.

10. Римшин В.И., Соловьев А.К., Амелин П.А., Никитин А.А. Теория деградации в жизненном цикле зданий и сооружений. Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15. № 5.

УДК 69.059.2

РЕКОНСТРУКЦИЯ ЗДАНИЯ СО СВОДЧАТЫМИ ПЕРЕКРЫТИЯМИ

Сергеев Михаил Сергеевич*, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций, **Аминов Михаил Алексеевич**, студент

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), sergeevmichael@inbox.ru

Аннотация. В статье рассмотрены результаты обследования кирпичного административного здания дореволюционной постройки. Объект имеет три этажа, подвал и чердачное пространство, конструктивно выполнен по

бескаркасной схеме с кирпичными сводами и деревянно-металлической стропильной системой. В ходе визуального и инструментального обследования выявлены значительные повреждения: трещины в стенах и сводах, загнивание элементов ферм, отсутствие вентиляции и гидроизоляции в опорных узлах. Состояние сводов признано ограниченно работоспособным, дальнейшая нагрузка может привести к разрушению. В статье предложены технические мероприятия по усилению и ремонту конструкций: замена перекрытий, инъектирование трещин, восстановление стропильных узлов, утепление и противопожарная обработка древесины. Результаты обследования и предложенные решения направлены на обеспечение безопасной эксплуатации и сохранение архитектурной ценности здания.
Ключевые слова: реконструкция, покрытие здания, стропильная ферма, несущая способность, дореволюционная постройка, метод конечных элементов, арочные своды, административное здание.

RECONSTRUCTION OF THE BUILDING WITH VAULTED CEILINGS

Sergeyev Mikhail Sergeyevich*, Ph.D, Associate Professor of the Department of Building Structures, **Aminov Mikhail Alekseevich**, student

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), sergeevmichael@inbox.ru

Abstract. The article presents the results of a comprehensive survey and reconstruction of the roofing of a production building constructed in the pre-revolutionary period. The structural scheme of the building, which includes trapezoidal and parallel trusses, I-beams, and crossbars, as well as the current condition of the roofing, is described in detail. Visual and instrumental inspections of the riveted joints of the trusses were conducted, including an assessment of the metal integrity and quality of the joints. Using the finite element method, the load-bearing capacity of the structures was analyzed, which confirmed their ability to withstand modern regulatory loads. Defects of the roof covering were revealed, including through-destruction and rotting of the wooden flooring. Based on the results of the survey, recommendations were developed for replacing the roof covering with modern materials and completely replacing the wooden flooring to ensure the durability and safety of the building.
Keywords: reconstruction, building covering, rafter truss, load-bearing capacity, pre-revolutionary construction, finite element method, arched vaults, administrative building.

Введение

Согласно имеющейся документации, реконструируемое здание было построено до 1917 г [1,2]. Здание – 3-х этажное с подвалом. Назначение –

административное [3]. Общий размер здания составляет 13,9х49,0 м. Высота этажа составляет 4,30-2,95 м. Здание бескаркасное. Фундаменты ленточные бутовые. Стены кирпичные. Чердачное перекрытие деревянное, междуэтажные и надподвальные перекрытия – кирпичные своды. Кровля – двускатная, с наружным водостоком, выполнена из металлических листов по деревянной обрешётке, уложенной по деревянно-металлическим треугольным фермам. Чердак выполнен холодным. Принятая конструктивная схема вместе с системой связей обеспечивает пространственную жесткость здания, за счет совместной работой внутренних, наружных стен, а также дисками перекрытий [4].

Стены основной части здания выполнены из каменной кладки керамическим полнотелым кирпичом. Толщина стен первого этажа составляет 900 мм, второго – 770 мм, третьего – 640 мм. По инструментальным замерам кирпич стен имеет марку 150…175, а раствор - марку 50…75. Прочность кирпичной кладки стен на сжатие для расчетов по СП 15.13330.2012 «Каменные и армокаменные конструкции» может быть принята 18 кгс/см2 с поправочным коэффициентом 0,85. Горизонтальная гидроизоляция стен выполнена в виде утолщённого слоя цементного раствора. Капиллярный подсос влаги несущими стенами выше цокольной части не значителен.

Стена основного здания с восточной стороны имеет сильные трещины с шириной раскрытия 2…8 мм. На момент обследования трещины усилены скобами из гладкой арматуры. По визуальным признакам трещины являются стабилизированными.

Перекрытия основной части здания выполнены в виде кирпичных сводов по цилиндрическому очертанию. Наибольший пролёт свода 7,9 м. Система перевязки кладки цепная, см. рис. 1. Материал сводов керамический кирпич марки 150…175, раствор - марки 50…75.



Рис. 1. Общий вид сводчатых перекрытий

В существующих сводах обнаружены множественные трещины с шириной раскрытия 0,5…2,0 мм, см. рис. 2. Трещины с наибольшим раскрытием обнаружены в перекрытии между вторым и третьим этажом. На момент обследования выполнено усиление металлическими скобами из гладкой арматуры. На части сводов срезаны металлические затяжки, для дальнейшей эксплуатации необходимо их восстановление. Ввиду существующих дефектов нагрузка на своды при дальнейшей эксплуатации может привести к обрушению.



Рис. 2. Трещины в сводчатых перекрытиях

Перекрытие существующей лестницы выполнено так же в виде кирпичных арочных сводов. Свод над первым этажом в ходе реконструкции планируется частично демонтировать для удобства подъёма по лестнице, в этом случае необходимо устройство усиления.

Для дальнейшей эксплуатации сводов рекомендуется провести очистку арочного свода от слабо держащихся частиц, цементного молока, пыли, грязи. Провести ремонт трещин методом инъектирования и устройства анкеров, восстановлением кладочного раствора. Общее состояние перекрытие из сводов оценивается как ограниченно-работоспособное.

Крыша обследуемой части здания деревянная двускатная. Стропильная система выполнена из треугольных ферм [5], установленных с шагом 2,5-3,1 м. Пролёт стропильных ферм в свету – 13,5 м. Верхний пояс ферм выполнен из бруса сечением 200х200(h) мм. Нижний пояс ферм выполнен из бруса сечением 200х240(h) мм. Раскосы - из бруса сечением 140х200 мм. Стойки выполнены металлическими из круглой стали Ø 30 мм и Ø 22 мм, см. рис. 3. К ним крепятся подвесы из круглой стали для крепления главных балок чердачного перекрытия, см. рис. 4. Упорами опорных узлов деревянных ферм

служат опорные брусья с деревянными подушками, уложенными на кирпичные несущие стены. Длина опорного узла – 1600 мм. В опорном узле нижний пояс усилен деревянными накладками из брусков 240х100 мм с соединением болтами с каждой стороны. Опорный узел выполнен деревянно-металлическим и стянут через металлические уголки болтами М14. Соединение верхнего пояса с нижним выполнено в виде лобового упора. Соединения поясов с подкосом выполнены в виде лобовых врубок с фиксацией металлическими скобами.



Рис. 3. Общий вид деревянных ферм покрытия

По стропильным фермам уложены прогоны, а по ним – стропильные ноги, на которые в свою очередь уложена обрешётка. Обрешетка выполнена из необрезной доски сечением 100х25 мм с шагом 250-300 мм. Опорами стропил служит мауэрлат, уложенный на кирпичные стены. По покрытию выполнены горизонтальные крестовые связи. По нижнему поясу ферм выполнены ходовые доски.

При обследовании треугольных стропильных деревянно-металлических ферм обнаружено, что опорные узлы ферм в местах опирания на опорный брус, уложенный на кирпичные стены через деревянную опорную подушку, заложены кирпичом, т.е. узы должным образом не вентилируются. Так же под опорами не выполнена гидроизоляция. Ввиду данных ошибок при эксплуатации произошло загнивание некоторых опорных участков ферм. На данный момент опорные узлы частично разобраны и вентилируются. Опорный брус и подушка в местах загнивания нижнего пояса ферм разрушены. Утепление чердачного перекрытия выполнено шлаком, что не отвечает современным требованиям по теплотехнике зданий [6]. Кровля здания

выполнена из металлических оцинкованных листов с фальцами. На момент обследования протечек в кровле не обнаружено.



Рис. 4. Узел стыковки продольных элементов фермы и подвеса чердачного перекрытия

Методы

Состояние строительных конструкций выполнялось в два этапа, на первом проводился визуальный осмотр с определением мест повреждений. На втором проводился инструментальный анализ прочности материалов с помощью неразрушающего метода контроля – ультразвуковым излучением. На основе полученных реальных характеристик материалов проводились поверочные расчёты конструкций: стен, сводов, фермы покрытия.

Результаты и обсуждение

В ходе анализа полученной информации было установлено, что для дальнейшей эффективной эксплуатации здания необходимо выполнить следующие работы:

- устройство новых перекрытий первого и второго этажей без опор на существующие своды;
- зачеканка/иньектирование трещин в стенах и сводах цементным раствором;
- восстановление срезанных затяжек по кирпичным сводам;
- устройство полов первого этажа;
- утепление чердачного перекрытия минераловатным утеплителем толщиной 150 мм;

- восстановление ступеней лестничного марша с первого этажа и ремонт бетонных ступеней вышележащих маршей;

- восстановление перемычек в оконных и дверных проёмах на месте сгнивших деревянных перемычек;

- разобрать заложенные кирпичом опорные узлы стропильных ферм;

- обеспечить продухи в чердачном пространстве;

- выполнить огнезащиту и антисептирование древесины стропильных ферм [7];

- элементы стропильных конструкций с продольными трещинами (мауэрлат и верхний пояс) усилить: заделать трещины, стянуть поперечными гибкими хомутами [8];

- выполнять постоянный мониторинг раскрытия трещин по стенам и сводам перекрытия.

Выводы

В ходе обследования обнаружены множественные трещины в стенах основного объёма, а также трещины в кирпичных сводах. Дальнейшую эксплуатацию стен необходимо вести с постоянным мониторингом раскрытия трещин [9,10]. Сводчатые перекрытия из-за имеющихся трещин не рекомендуется подвергать нагрузке, а новые перекрытия встроить без опоры на существующие.

Список использованной литературы

1. Крылова С. В. Реконструкция производственного здания в исторической застройке: Методические указания. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет | ЭБС АСВ, 2015. 33 с.

2. Рощина С. И., Лукин М. В., Сергеев М. С., Лисятников М. С. Реконструкция жилого комплекса в Московской области // Актуальные вопросы развития строительной отрасли, экологической и промышленной безопасности: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Вологда, 17 ноября 2022 года. Вологда: Вологодский государственный университет, 2023. С. 192-195.

3. Самойкина В. Н., Нифонтов А. В. Реконструкция производственного здания под торгово-офисный центр // Межвузовский сборник статей лауреатов конкурсов: Сборник статей. Том Выпуск 11. Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2009. С. 232-234.

4. Швец Г. А., Тугбаева Ю. В. Реконструкция многоэтажного производственного здания // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2019. № 4(138). С. 152-155.

5. Репин В.А., Лукина А.В., Усов А.С. Рациональные конструктивные решения треугольных ферм // Строительная механика инженерных

конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 2. С. 199–209. http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023- 19-2-199-209

6. Шихов А. Н. Реконструкция гражданских и промышленных зданий: монография / А. Н. Шихов. – Пермь: ИПЦ «Прокростъ», 2015. С. 371-385.

7. Лукин М. В., Рощина С. И. Ремонтопригодность несущих деревянных конструкций // Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование: Сборник материалов Международной научно-практической конференции, Иваново, 21–24 марта 2024 года. Иваново: Ивановский государственный политехнический университет, 2024. С. 98-100.

8. Техническая эксплуатация и усиление деревянных конструкций [Электронный ресурс] : учеб. пособие / М. В. Лукин [и др.] ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2024. – 176 с. – ISBN 978-5-9984-1810-5

9. Андриянов С. П. Ретроспективный анализ подходов к состоянию ограждающих конструкций для опасных производственных объектов // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16, № S4. DOI: EDN VAZRZI.

10. Лукин М. В., Лисятников М. С., Рощина С. И. Остаточный ресурс утеплителя стен незавершенного строительством зданий после длительного воздействия неблагоприятных климатических факторов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023. № 6(774). С. 110-118. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-774-6-110-118.

УДК 69.059.2

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОКРЫТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗДАНИЯ ДОРЕВОЛЮЦИОННОЙ ПОСТРОЙКИ

Сергеев Михаил Сергеевич*, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций, **Мясников Даниил Олегович**, ассистент кафедры строительных конструкций, **Куприянова Юлия Витальевна**, магистрант кафедры строительных конструкций

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), sergeevmichael@inbox.ru

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного обследования и реконструкции покрытия производственного здания, возведённого в дореволюционный период. Подробно описана конструктивная схема здания, включающая стропильные фермы трапециевидной и параллельной конфигураций, двутавровые балки и прогоны, а также текущее состояние

кровельного покрытия. Проведены визуальные и инструментальные проверки заклёпочных соединений стропильных ферм, включающие оценку целостности металла и качества узлов. С использованием метода конечных элементов выполнен анализ несущей способности конструкций, который подтвердил их способность выдерживать современные нормативные нагрузки. Выявлены дефекты кровельного покрытия, включая сквозные разрушения и загнивание деревянного настила. На основе результатов обследования разработаны рекомендации по замене кровельного покрытия на современные материалы и полной замене деревянного настила для обеспечения долговечности, и безопасности эксплуатации здания.
Ключевые слова: реконструкция, покрытие здания, стропильная ферма, заклёпочные соединения, несущая способность, дореволюционная постройка, метод конечных элементов.

RECONSTRUCTION OF THE COVERING OF A PRE-REVOLUTIONARY PRODUCTION BUILDING

Sergeyev Mikhail Sergeyevich*, PhD, Associate Professor of the Department of Building Structures, **Myasnikov Daniil Olegovich**, Assistant, Department of Building Structures, **Kupriyanova Yulia Vitalievna**, Master's student of the Department of Building Structures

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), sergeevmichael@inbox.ru

Abstract. The article presents the results of a comprehensive survey and reconstruction of the roofing of a production building constructed in the pre-revolutionary period. The structural scheme of the building, which includes trapezoidal and parallel trusses, I-beams, and crossbars, as well as the current condition of the roofing, is described in detail. Visual and instrumental inspections of the riveted joints of the trusses were conducted, including an assessment of the metal integrity and quality of the joints. Using the finite element method, the load-bearing capacity of the structures was analyzed, which confirmed their ability to withstand modern regulatory loads. Defects of the roof covering were revealed, including through-destruction and rotting of the wooden flooring. Based on the results of the survey, recommendations were developed for replacing the roof covering with modern materials and completely replacing the wooden flooring to ensure the durability and safety of the building.
Keywords: reconstruction, building coverage, roof truss, riveted joints, load-bearing capacity, pre-revolutionary construction, finite element method.

Введение

Здание производственного назначения прямоугольной формы с габаритными размерами 58,9 х 35,7 м. Высота здания переменная, в среднем

8,8 м. Конструктивная схема здания – неполный каркас, с наружными несущими стенами и колоннами по центру здания. Пространственная жёсткость здания в целом обеспечивается жёстким защемлением колонн в фундаменты, а также системой вертикальных и горизонтальных связей [1, 2]. Целью работы являлось определение состояния строительных конструкций покрытия здания, а также возможность реконструкции покрытия.

Несущими элементами покрытия здания в центральной части является стропильная ферма трапециевидной формы, с юго-западной стороны стропильная ферма с параллельными поясами, с северо-восточной стороны балки двутаврового сечения.

Неизменяемость покрытия в горизонтальной плоскости обеспечивается сплошным диском, образованным прогонами и горизонтальными связями. Связи установлены в третях здания по длине и выполнены крестовыми из уголков. Прогоны на основной части здания выполнены из двутавровых балок №20, с шагом 2,0…2,1 м. Учитывая действующие нормативные снеговые нагрузки, сечение прогонов достаточно для безопасной эксплуатации [3].

Покрытие кровли выполнено стальными кровельными листами по сплошному деревянному настилу из досок. На части кровли деревянный настил заменён на листы профилированного настила. При осмотре кровли выявлены места сквозного разрушения покрытия, деревянный настил имеет повсеместное загнивание и требует замены [4,5]. Состояние кровли неудовлетворительное.

Стропильные балки с северо-восточной стороны выполнены из двутавра №26 и опираются на металлические колонны в средней части здания и кирпичную стену с краю. Шаг балок соответствует шагу колон здания и составляет, 5,1…5,2 м. Несущая способность балок на действующие нагрузки обеспеченна, дефектов у осмотренных балок, влияющих на их несущую способность не обнаружено, состояние по результатам обследования оценивается как работоспособное [6, 7].

Стропильная ферма в центральной части здания выполнена из спаренных уголков на заклёпочных соединениях. Опиранием фермы служат металлические колонны по центру здания. Фермы выполнены пролётом 20,0 м и уложены с шагом 5,1…5,2 м. Пояса ферм в средней части выполнены из спаренных, в тавр, уголков 90х90х10 мм, в крайних частях из уголков сечением 75х75х8 мм. Раскосы, так же выполнены из спаренных, в тавр, уголков сечением 75х75х8 мм, стойки приняты из спаренных в крест уголков сечением 56х56х6 мм. Общий вид покрытия здания представлен на (рис. 1.)



Рис. 1. Общий вид центральной части покрытия здания

Посередине фермы покрытия устроен светоаэрационный фонарь шириной 4,0 м. Покрытие фонаря, как и всей кровли, находится в неудовлетворительном состоянии и требует замены [8].

Методы

Проверка заклёпочных соединений выполнялась в два этапа – визуально и инструментально. Визуально фиксировались: равномерность расширения тела заклёпки, интегритет головки заклёпки, отсутствие повреждений на материале основания вокруг места установки, трещин и деформаций не обнаружено.

Инструментально устанавливалась целостность металла заклёпок с помощью ультразвукового дефектоскопа. Дефектов тела металла, значительно влияющих на несущую способность обнаружено, не было. Вид заклёпочного узла приведён на рис. 2 [9].



Рис. 2. Узел фермы собранной на заклёпочных соединениях

Результаты и обсуждение

Несущая способность фермы с учётом новых нагрузок определялась методом конечных элементов в расчётной программе BASE. Существующие сечения элементов фермы с учётом прошедшего времени эксплуатации и состояния узлов соединения имеют достаточную несущую способность для восприятия действующих нагрузок [10]. Результаты полученных усилий приведены на рис. 3.

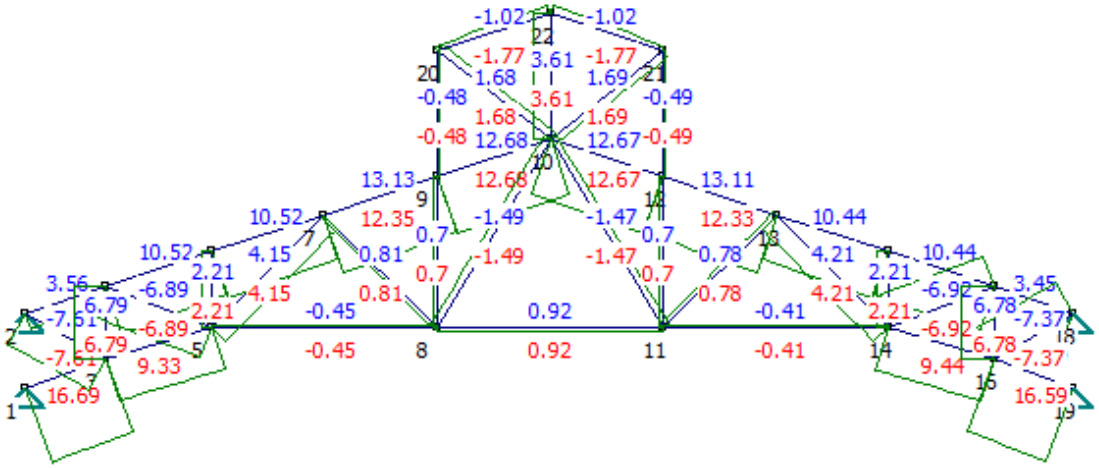


Рис. 3. Определение усилий в элементах фермы

Выводы

По техническому состоянию и конструктивному исполнению элементы покрытия на момент обследования, имеют работоспособное состояние. Фермы на заклёпочных соединениях выполнены с достаточным запасом прочности под существующие нагрузки [10].

Список использованной литературы

1. Швец Г. А., Тугбаева Ю. В. Реконструкция многоэтажного производственного здания // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2019. № 4(138). С. 152-155.

2. Андриянов С. П. Ретроспективный анализ подходов к состоянию ограждающих конструкций для опасных производственных объектов // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16, № S4. DOI: EDN VAZRZI.

3. Рощина С. И., Лукин М. В. Облегченные ребристые плиты перекрытий вспарушенного типа // Международная конференция по физике материалов, строительным конструкциям и технологиям в строительстве, промышленной и производственной инженерии (МРСРЕ-2024): сборник трудов V международной научно-технической конференции, Владимир, 23–25 апреля 2024 года. Владимир: АРКАИМ, 2024. С. 131-135.

4. Лукин М. В., Рощина С. И. Ремонтопригодность несущих деревянных конструкций // Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование: Сборник материалов Международной научно-практической конференции, Иваново, 21–24 марта 2024 года. Иваново: Ивановский государственный политехнический университет, 2024. С. 98-100.

5. Рощина С. И., Лукин М. В., Сергеев М. С., Лисятников М. С. Реконструкция жилого комплекса в Московской области // Актуальные вопросы развития строительной отрасли, экологической и промышленной безопасности: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Вологда, 17 ноября 2022 года. Вологда: Вологодский государственный университет, 2023. С. 192-195.

6. Лукин М. В., Лисятников М. С., Рощина С. И. Остаточный ресурс утеплителя стен незавершенного строительством зданий после длительного воздействия неблагоприятных климатических факторов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023. № 6(774). С. 110-118. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-774-6-110-118.

7. Рощина С. И., Попова М. В., Тужилова М. В. Анализ анкерных болтов, используемых в основании металлических колонн // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения: Материалы национальной (с международным участием) научно-практической конференции, Казань, 10–11 апреля 2024 года. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. С. 443-447.

8. Крылова С. В. Реконструкция производственного здания в исторической застройке: Методические указания. Санкт-Петербург: Санкт-

Петербургский государственный архитектурно-строительный университет ЭБС АСВ, 2015. 33 с.

9. Самойкина В. Н., Нифонтов А. В. Реконструкция производственного здания под торгово-офисный центр // Межвузовский сборник статей лауреатов конкурсов: Сборник статей. Том Выпуск 11. Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2009. С. 232-234.

10. Булатова Р. К., Трофимов А. Ю. Реконструкция системы теплоснабжения производственного здания // Материалы 75-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ, Уфа, 17–18 апреля 2024 года. Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2024. С. 309.

УДК 691.328-413

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УСИЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ МОНОЛИТНОЙ ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ, ПОДВЕРГШЕЙСЯ ВОЗДЕЙСТВИЮ ПОЖАРА, С ПОМОЩЬЮ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА

Стрекалкин Артем Андреевич*, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций, **Распопина Марина Максимовна**, магистрант кафедры строительных конструкций

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), a.a.strekalkin@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена изучению современного метода усиления монолитных железобетонных конструкций с использованием композитных материалами на основе углеволокна. В частности, рассмотрен вопрос усиления данным способом железобетонных конструкций, подвергшихся огневому воздействию. В статье подчеркнута актуальность темы для исследований в связи с распространенностью железобетонных конструкций в современном строительстве и необходимости повышения безопасности эксплуатации зданий после пожара. На основе результатов произведенных расчетов обоснована эффективность применения данного метода для усиления пролетных зон монолитной железобетонной плиты покрытия одноэтажного здания. Для этого было учтено изменение расчетных характеристик железобетона при воздействии на него температур до 500°С. Таким образом,

данный метод усиления конструкций имеет значительный потенциал применения в реконструкции зданий и сооружений, оказавшихся в условиях пожара.
Ключевые слова: углеволокно, железобетонные конструкции, усиление, эффективность.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF REINFORCING THE STRUCTURE OF A MONOLITHIC FLOOR SLAB EXPOSED TO FIRE USING A CARBON FIBER-BASED COMPOSITE MATERIAL

Strekalkin Artyom Andreevich*, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures, **Raspopina Marina Maksimovna,** Master's student of the Department of Building Structures

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), a.a.strekalkin@gmail.com

Abstract. The article is devoted to the study of a modern method of reinforcing monolithic reinforced concrete structures using carbon fiber-based composite materials. In particular, the issue of reinforcement of reinforced concrete structures exposed to fire by this method was considered. The article highlights the relevance of the topic for research in connection with the prevalence of reinforced concrete structures in modern construction and the need to improve the safety of buildings after a fire. Based on the results of the calculations, the effectiveness of using this method to strengthen the span zones of a monolithic reinforced concrete slab covering a single-storey building is substantiated. For this purpose, the change in the design characteristics of reinforced concrete was taken into account when exposed to temperatures up to 500 °C. Thus, this method of reinforcing structures has a significant potential for use in the reconstruction of buildings and structures caught in a fire.
Keywords: carbon fiber, reinforced concrete structures, reinforcement, efficiency.

Введение

В современном строительстве монолитные железобетонные конструкции являются одним из самых распространенных типов строительных конструкций. В том числе очень часто встречаются монолитные плиты перекрытий. Они обладают рядом положительных аспектов это высокая несущая способность, долговечность и технологичность возведения. Однако при пожаре такие конструкции подвергаются значительным термическим нагрузкам, приводящим к снижению их эксплуатационных характеристик.

Воздействие высоких температур вызывает деградацию бетона (потерю прочности, растрескивание, отслоение защитного слоя); снижение прочности арматуры (при нагреве свыше 500°C сталь теряет до 50% прочности);

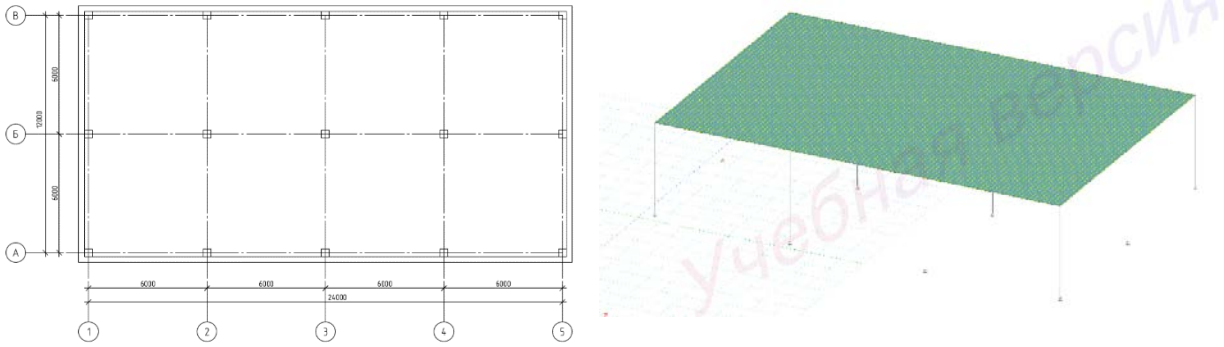
ухудшение сцепления между бетоном и арматурой, что снижает жесткость и несущую способность конструкции [1].

Традиционные методы восстановления (например, наращивание сечения бетоном или установка дополнительных стальных элементов [2]) не всегда эффективны из-за большого веса, сложности монтажа и коррозионной уязвимости. В этой связи композитные материалы на основе углеродного волокна (CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymers) представляют собой перспективную альтернативу. Они обладают высокой удельной прочностью, легкостью, коррозионной стойкостью, возможностью быстрого монтажа без значительного увеличения нагрузки на конструкцию [3].

Актуальность и значимость рассматриваемой темы связана с необходимостью повышения безопасности эксплуатации зданий после пожара, оптимизацией методов реконструкции с использованием современных материалов, снижением затрат на восстановительные работы за счет применения легких и долговечных композитов.

Методы

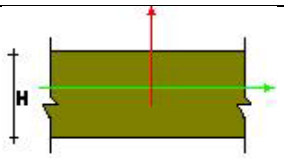
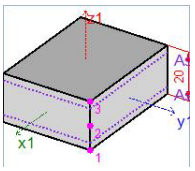
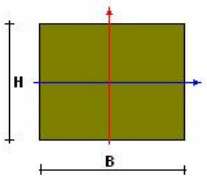
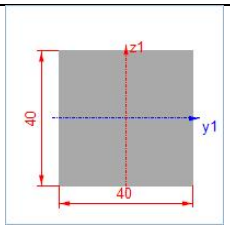
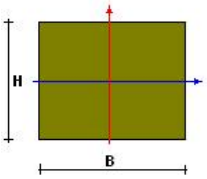
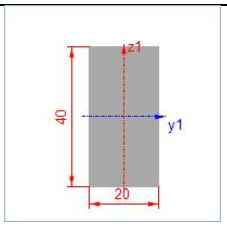
Оценку эффективности усиления композитными материалами пролетных зон монолитных железобетонных плит перекрытий после воздействия пожара выполним на примере расчетов модели здания с применением расчетного программного комплекса ПК ЛИРА софт. План и расчетная модель здания приведены на рисунке 1. Данное здание одноэтажное с монолитным железобетонным каркасом, шаг сетки несущих колонн 6х6 м. Сведения о размерах поперечных сечений приведены в таблице 1.



А Б

Рис. 1. Рассчитываемая плита покрытия, А – план здания, Б – расчетная схема здания

Таблица 1. Сечения элементов конструкций

Номер	Имя	Описание	Изображение	Вид	Параметры
1	Пластина (20)	Плита			H=20см
2	Брус (40x40)	Колонна			B=40см; H=40см
3	Брус (20x40)	Балка			B=20см; H=40см

Далее произведем сбор нагрузок на плиту покрытия, учитывая снеговую нагрузку и нагрузку от кровельного покрытия. (см. табл. 2).

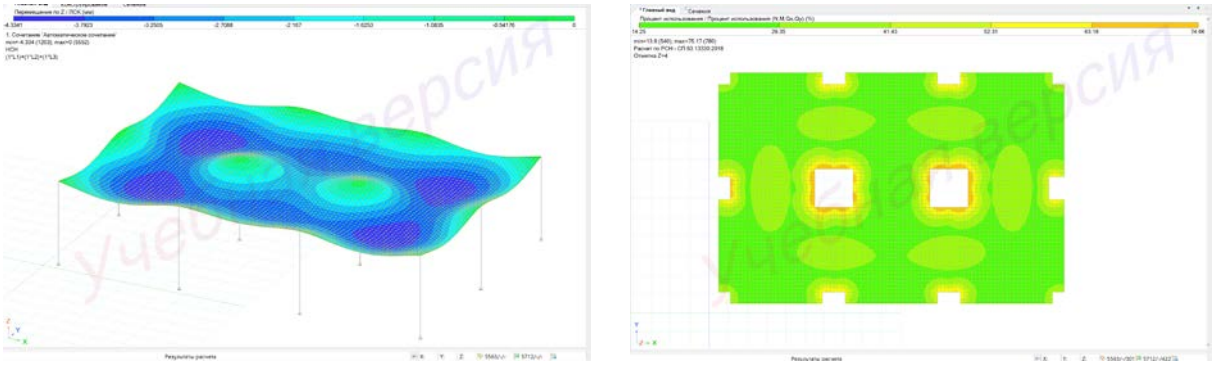
Таблица 2. Сбор нагрузок

№	Наименование нагрузки	Нормативное значение, тс/м2	Коэффициент надежности по нагрузке, γ_f	Расчетное значение, тс/м2
	I Постоянные:			
1	Кровельное покрытие (система ТН-КРОВЛЯ Стандарт)	0.11	1.2	0.13
2	Собственный вес	рассчитывается программой автоматически	1.1	рассчитывается программой автоматически
	II Кратковременные:			
3	Снеговая	0.2	1.4	0.28
	Итого:	0.31		0.41

Результаты и обсуждение

На первом этапе анализа был выполнен расчет исходной конструкции плиты покрытия здания до воздействия на нее пожара. Плита выполнена из тяжелого бетона класса по прочности В25. Армирование плиты перекрытия принято арматурными стержнями диаметром 16 мм класса А500С с шагом 200х200 мм (10,05 $см^2$/п.м).

По результатам расчета (см. рис. 2) исходная конструкция обладает необходимой прочностью в пролете при заданном армировании, максимальный процент использования в пролетной зоне – 79%, что не превышает 100 (дополнительное армирование опорных зон в данном случае не учитывается). Деформации также находятся в пределах допустимых. Максимальное перемещение по оси Z составляет 5,14 мм при предельно допустимом – 30 мм.



А Б

Рис. 2. Результат расчета исходной конструкции плиты покрытия, А - перемещение по Z исходной конструкции, Б - процент использования исходной конструкции в пролетной зоне (N,M,Qx,Qy)

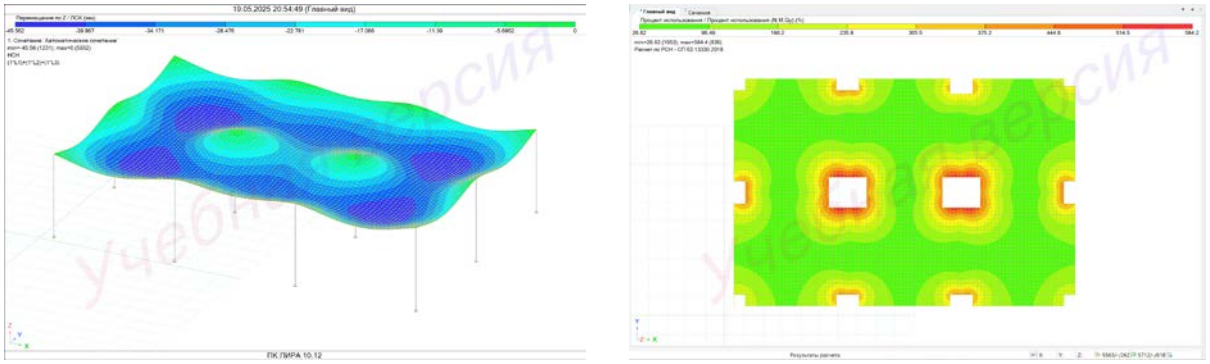
В ходе воздействия высоких температур на несущие конструкции в течение определенного периода времени, прочностные характеристики материалов снижаются.

Предположим, что в ходе пожара средняя температура сжатой зоны поперечного сечения плиты из бетона составила 500°С, защитный слой арматуры уменьшился до 20 мм. Тогда согласно таблице 2.2 [1] коэффициент условий работы бетона при сжатии γ_b = 0,7, при растяжении γ_{tt} = 0,15 (после охлаждения), коэффициент ползучести бетона после нагрева $\varphi_{b,cr}$=13.

Влияние температуры на изменение нормативных и расчетных сопротивлений арматуры учитывают умножением прочностных характеристик арматуры при растяжении и сжатии на коэффициент условия работы арматуры γ_{st}. После нагрева арматуры до температуры 500°С и после ее охлаждения в соответствии с таблицей 2.8 [1] γ_{st}=0,9 для арматуры класса А500.

По результатам второго этапа расчета, в котором замоделирована ситуация воздействия пожара на конструкцию, внутренние усилия (изгибающие моменты) в конструкции не изменились, деформации (прогиб) резко увеличивается. По сравнению с исходной конструкцией перемещения увеличиваются почти в 10 раз, составляют 45 мм, что превышает предельно допустимый прогиб при рассматриваемом пролете (30 мм). Процент использования конструкции также резко возрос и превышает 100% в несколько раз, что свидетельствует о недостаточной несущей способности

конструкции. В связи с данным расчетом можно сделать вывод о необходимости усиления данной конструкции.



А Б

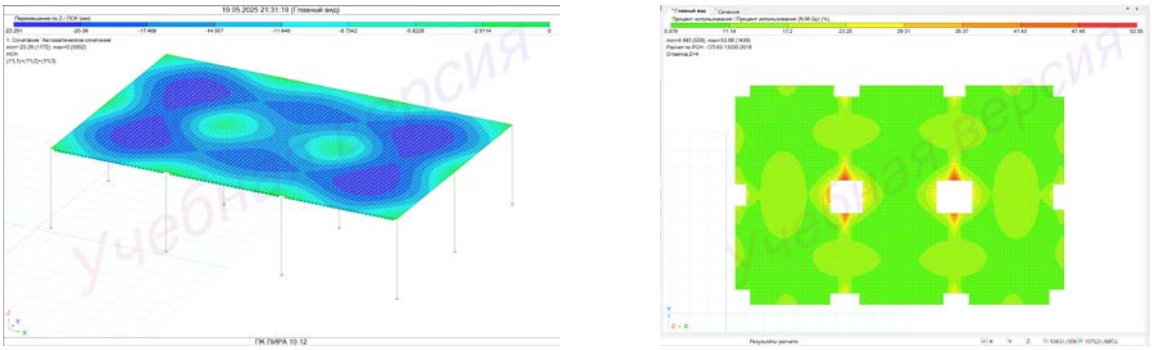
Рис. 3. Результат расчета конструкции плиты покрытия после воздействия пожара, А - перемещение по Z плиты перекрытия после пожара, Б - процент использования плиты перекрытия после воздействия пожара

Рассмотрим вариант усиления изучаемой конструкции с применением углеволокна и оценим его эффективность для конструкций после воздействия на них пожара.

Введем в расчет пластинчатые элементы, моделирующие композитный материал, закрепленный снизу перекрытия в пролетных зонах. Для соединения с пластиной плиты перекрытия используем функцию «Жесткая вставка» со смещением на 100 мм, половина толщины перекрытия.

Так как в базе данных материалов ПК ЛИРА софт отсутствуют композитные материалы, создаем линейный изотропный материал и задаем ему свойства в соответствии с таблицей 1 СП 164.1325800.2014. Толщину для рассматриваемого материала зададим 5 мм.

Далее был произведен расчет усиленных конструкций. Также как на предыдущих двух этапах расчета получены перемещения и процент использования конструкции (см. рис. 4).



А Б

Рис. 4. Результат расчета конструкции усиленной плиты покрытия, А - перемещение по Z усиленной конструкции, Б - процент использования усиленной конструкции

Выполнение третьего этапа расчета указывает на эффективность принятого усиления, так как внутренние усилия в конструкции снизились по сравнению с усилиями в исходной конструкции; максимальный прогиб составил 23 мм, что меньше предельно допустимого (30 мм) и возникающего в неусиленной конструкции; а также процент использовании плиты перекрытия в пролетной зоне стал менее 100%, что свидетельствует об обеспечении прочности конструкцией.

Выводы

Для окончательного вывода об эффективности усиления железобетонной плиты перекрытия с применением углеродного волокна сравним ключевые результаты проведенных расчетов в табличной форме (см. табл. 3) и с применением диаграмм (см. рис. 5, 6).

Таблица 3. Сравнение результатов расчетов

Сравниваемые характеристики	Исходное состояние конструкций	Конструкции после воздействия пожара	Конструкции с усилением
Максимальное перемещение по оси z	-4,33 мм	-46 мм	-23 мм
Максимальный процент использования в пролетной зоне	52,21%	235,8%	29,31%



Рис. 5. Диаграмма максимальных перемещений в пролетной зоне



Рис. 6. Диаграмма максимального процента использования в пролетной зоне

Рассматриваемое в работе усиление оказалось эффективным способом привести конструкцию монолитного железобетонного перекрытия к работоспособному состоянию, восстановить его несущую способность.

По результатам расчета усиление композитным материалом позволило в 2 раза снизить прогиб конструкции перекрытия, после чего прогиб стал меньше предельно допустимого, а именно – 23 мм при 46 мм в конструкции, подвергнутой термическому воздействию пожара.

Процент использования конструкции также снизился в несколько раз, составил около 29% в пролетной зоне плиты. Конструкция, находившаяся в условиях пожара, оказывается перегруженной, не способной обеспечить прочность. При примененном усилении в пролетной зоне плиты перекрытия перегрузки не наблюдается, она становится способной обеспечить прочность.

Список использованной литературы

1. Пособие по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций из тяжелого бетона (к СТО 36554501-006-2006). – Москва, 2008

2. Леденёв В.В., Савкин В.С. Повреждение и восстановление железобетонных конструкций при пожаре. — СПб.: СПбГАСУ, 2015. — 256 с.

3. Тельтов В. А. Усиление строительных конструкций композитными материалами : учебное пособие / В. А. Тельтов, В. К. Лапшин ; под ред. В. И. Римшина. — Москва : АСВ, 2018. — 320 с. — ISBN 978-5-4323-0124-5.

4. Teng, J. G. FRP-Strengthened RC Structures / J. G. Teng, J. F. Chen, S. T. Smith, L. Lam. — Chichester : Wiley, 2002. — 245 p. — ISBN 0-471-48706-

5. Иванов, Д. С. Повышение несущей способности железобетонных конструкций углепластиковыми композитами : диссертация кандидата технических наук : 05.23.01 / Д. С. Иванов. — Москва : МГСУ, 2020. — 178 с.
6. Баженов Ю.М., Комар А.Г. Технология бетонных и железобетонных изделий. — М.: Стройиздат, 1984. — 672 с.
7. Ройтман А.И., Казанцев В.В. Реконструкция и усиление строительных конструкций. — М.: АСВ, 2010. — 320 с.
8. Гвоздев А.А., Белов В.В. // Усиление железобетонных конструкций композитными материалами после пожара // Журнал «Бетон и железобетон». — 2018. — № 5. — С. 34–39.
9. Fib Bulletin 14. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. — Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib), 2001. — 138 p. — ISBN 978-2-88394-054-1.
10. Патент РФ 2684874 Способ усиления железобетонных конструкций углеволокном / В. К. Лапшин, А. И. Петров ; заявитель и патентообладатель НИИЖБ. — № 2018123456; заявл. 20.06.2018; опубл. 10.04.2019, Бюл. № 10. — 12 с.

УДК 624.131.5

ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ В РАЙОНЕ СКЛОНОВ

Тошмуқумов Беҳзод Жуманазар уғли, PhD докторант
Самаркандский государственный архитектурно строительный университет
(Республика Узбекистан, город Самарканд, улица Лолазор, дом 70, 140143)
bekzod060696@gmail.com

Аннотация. В данной статье проанализирована эффективность применения геотекстильных материалов для повышения устойчивости и прочностных характеристик грунтов, расположенных вблизи склонов. Эксперименты проводились на специально смоделированной плоской лотковой установке. В рамках исследования определялись значения прогиба плиты при различных вариантах укладки геотекстиля (горизонтально и вертикально). Полученные результаты показали, что использование геотекстиля представляет собой рациональное инженерно-экономическое решение для обеспечения стабильности грунтов.
Ключевые слова: геотекстиль, плоский лоток, устойчивость грунта, плита, выпуклый прогиб, продольный изгиб.

TECHNOLOGIES FOR IMPROVING THE STABILITY AND STRENGTH PROPERTIES OF SOILS IN SLOPE AREAS

Bekhzod Toshmuqumov, PhD Candidate
Samarkand State Architectural and Construction University
(Republic of Uzbekistan, Samarkand city, Lolazor Street, House 70, 140143)
bekzod060696@gmail.com

Abstract. This article analyzes the effectiveness of using geotextile materials to enhance the stability and strength characteristics of soils located near slopes. The experiments were conducted using a specially modeled flat tray apparatus. The study focused on determining the deflection values of a steel plate under different configurations of geotextile placement (horizontal and vertical). The results demonstrated that the application of geotextile is a rational engineering and economic solution for ensuring soil stability.
Keywords: geotextile, flat tray, soil stability, plate, convex deflection, longitudinal bending.

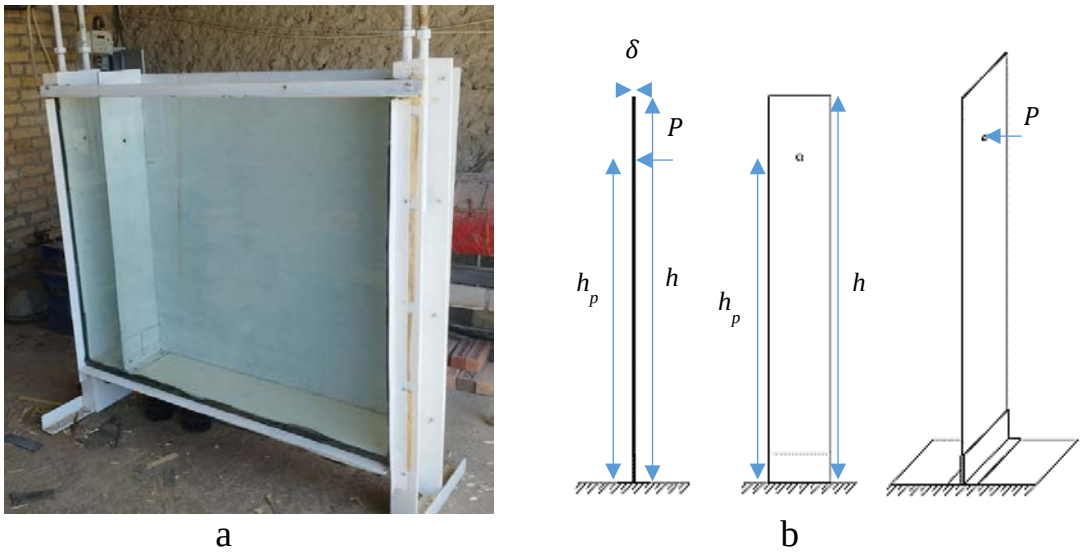
Введение

На протяжении многих лет в целях развития строительной и геотехнической отрасли активно применяются различные современные технологии [1]. Основной целью внедрения таких инноваций является повышение прочностных характеристик грунтов при строительных и геотехнических работах, а также снижение экономических затрат. Однако в связи с различными условиями и особенностями применения этих технологий, их невозможно использовать универсально для всех типов строительных и геотехнических объектов [2, 3, 4]. В качестве характерного примера участков, где применяются такие технологии, можно привести откосы и склоны. Одной из ключевых задач при применении новых решений в этих условиях является обеспечение устойчивости склонов [4, 5, 6]. В настоящее время среди наиболее распространённых методов стабилизации откосов можно выделить: озеленение и лесонасаждение, устройство подпорных стен и преград, террасирование, упрочнение грунтов различными способами и другие инженерные мероприятия [5, 6, 7, 8, 9].

Материалы и методы

Среди перечисленных технологий особое внимание уделяется мероприятиям по упрочнению грунтов с использованием различных химических составов и геотекстильных материалов [4]. Химические методы упрочнения применяются с целью увеличения плотности грунта, однако их реализация часто сопряжена с высокими экономическими затратами. Учитывая данный фактор, в настоящем исследовании рассматривается использование геотекстильных материалов как более экономически целесообразного решения. Для оценки эффективности геотекстиля

используется специально смоделированная экспериментальная установка - плоский лоток. Основное назначение данной модели заключается в воспроизведении условий, при которых на грунт вблизи склонов действуют как силы собственного веса, так и внешние нагрузки, вызывающие активное и пассивное давление. Это позволяет провести моделирование поведения грунта при различных инженерных сценариях. Плоский лоток представляет собой конструкцию в виде рамы, оснащённую вертикальными стойками и горизонтальными верхними и нижними балками, выполненными из профильного швеллера (см. Рисунок 1,a). На расстоянии 20 см от левой стойки лотка размещена плита, позволяющая моделировать давление и смещение грунтовой массы. Эта плита имеет толщину 5 мм и ширину 220 мм, и она жёстко зафиксирована в основании. Для измерения прогиба и смещения плиты использовался шарнир, установленный на высоте h = 1,03 м от основания. Геометрические параметры фиксированной плиты, а также расчётная схема её взаимодействия с грунтом приведены на Рисунке 1,b.



a b

Рисунок 1. a-общий вид экспериментальной установки, b-схема закреплённой стальной плиты.

Результаты и анализ

В качестве моделируемого грунта при проведении эксперимента использовался мелкий песок. В процессе испытаний измерялись значения прогиба и смещения плиты, возникающие под действием давления, создаваемого собственным весом насыпанного песка. Для этого внутренняя часть плоского лотка последовательно заполнялась песком до заданной высоты. Каждый слой утрамбовывался и выравнивался по горизонтали с целью обеспечения равномерного распределения нагрузки на модельную плиту. Плита, жёстко зафиксированная в нижней части и снабжённая шарниром в верхней части, под воздействием собственного веса насыпанного песка начала изгибаться в выпуклую сторону (см. Рисунок 2). Процесс

нагружения осуществлялся поэтапно до достижения общей высоты насыпи h = 1,25 м. На каждом этапе измерялись значения прогиба плиты с помощью индикаторов, установленных на различных высотах: h_1=0,123 м, h_2=0,342 м, h_3= 0,57 м, h_4=0,787 м, h_5=1,0 м, h_6=1,31 м Показания индикаторов записывались для каждого уровня засыпки. Для определения величины прогиба в верхней части плиты, шарнирное соединение постепенно ослаблялось вручную в процессе наблюдений. В этом случае, когда верхняя часть плиты оставалась свободной, то есть без шарнирного соединения, наблюдался продольный изгиб плиты. Для повышения достоверности экспериментальных данных опыт был повторён также при условии, что верхняя часть плиты оставалась полностью свободной, без установки шарнира. В ходе проведения эксперимента, в процессе послойной засыпки грунта внутрь лотка, под воздействием активного давления грунта плита постепенно изгибалась в продольном направлении. На каждом этапе измерялись показания индикаторов, фиксирующих величину прогиба. Характер изгиба плиты как в случае с установленным шарниром, так и при свободном верхнем крае (без шарнирного соединения), представлен на Рисунке 3. С целью снижения прогиба плиты под воздействием давления, вызванного собственным весом грунта, в эксперименте был применён геотекстильный материал. В процессе испытаний геотекстиль укладывался в двух вариантах: в горизонтальном положении между слоями песка, где в качестве промежуточного слоя использовался мелкий щебень и в вертикальном положении вдоль боковых стенок лотка. Этапы выполнения данных опытов приведены на Рисунке 4. Для сравнения значений прогиба плиты в различных условиях была составлена обобщённая диаграмма, представленная на Рисунке 5.



Рисунок 2. Процесс изгиба плиты под действием давления.



a) b)

Рисунок 4. Применение геотекстиля: a-горизонтально, b-вертикально.



a) b)

Рисунок 3. Продольный изгиб плиты: a-при закреплённом крае, b-при свободном.

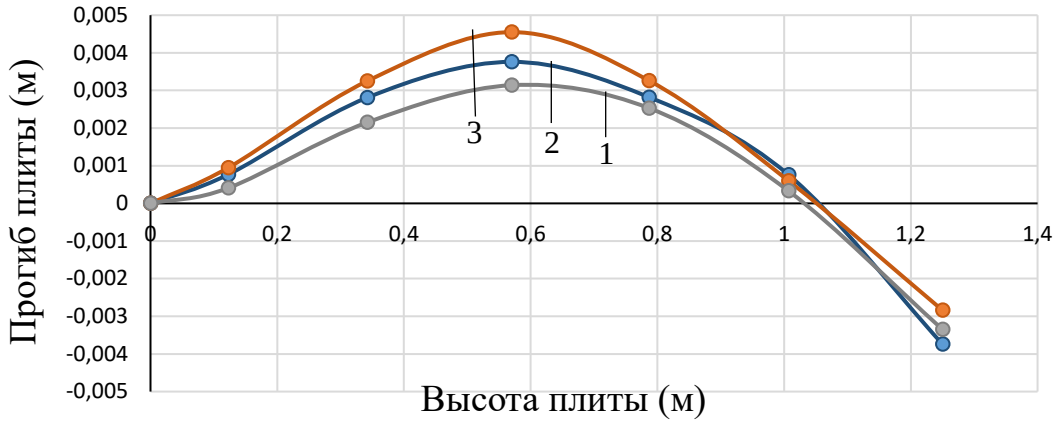


Рисунок 5. График зависимости между прогибом и высотой засыпки. 1-функция изгиба плиты при горизонтальном расположении геотекстильного материала; 2-функция изгиба плиты при вертикальном расположении геотекстиля; 3-функция изгиба плиты без использования геотекстиля.

Как видно из графика, представленного на Рисунке 5, функция прогиба плиты с применением геотекстильного материала оказалась значительно более эффективной по сравнению с функцией прогиба без использования геотекстиля. На основе полученных экспериментальных данных была построена функция продольного изгиба плиты, представленная на Рисунке 6.

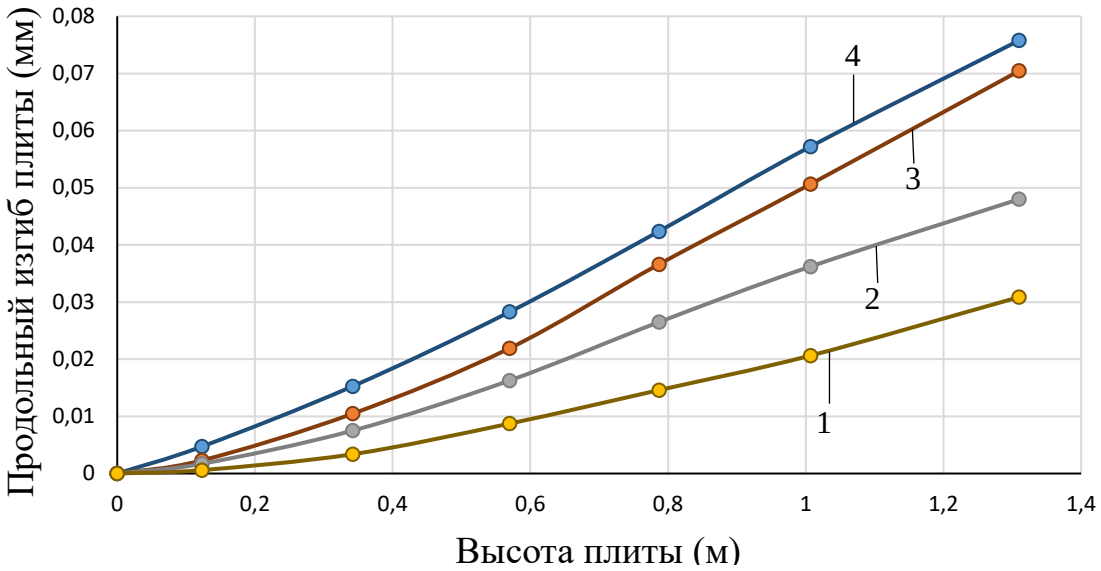


Рисунок 6. Продольный изгиб плиты при разных условиях армирования. 1-функция изгиба плиты при горизонтальной укладке геотекстильного материала; 2-функция изгиба плиты при вертикальном расположении геотекстиля; 3, 4-функции изгиба плиты без использования геотекстиля и без установки шарнира (при свободной верхней части).

Из графиков, представленных на Рисунке 6, видно, что при использовании геотекстильного материала функция продольного изгиба плиты принимает наименьшие значения, что свидетельствует о повышении устойчивости и снижении деформации конструкции. Согласно результатам эксперимента, в условиях без применения геотекстиля значения прогиба плиты оказались наибольшими. Наиболее эффективные результаты были зафиксированы при горизонтальной укладке геотекстиля. Во время процесса заполнения плоского лотка грунтом наблюдалось, что при закреплённой (с шарниром) верхней части плиты, а также при её постепенном освобождении (расслаблении шарнира), величины изгиба значительно уменьшались по сравнению с контролем. Результаты экспериментов с вертикальным расположением геотекстиля показали лучшую эффективность по сравнению с условиями без его применения. Однако значения прогиба плиты при вертикальной укладке были выше, чем в случае горизонтального расположения геотекстиля, что указывает на меньшую эффективность данного способа армирования по сравнению с горизонтальным вариантом.

Выводы

Проведённые эксперименты и аналитические наблюдения показали, что геосинтетические материалы, в частности геотекстиль, являются эффективным средством упрочнения грунтов. Как видно на рисунках 6 и 7, использование геотекстиля приводит к заметному снижению прогиба плиты под действием активного давления грунта. Особенно ярко этот эффект проявляется при горизонтальной укладке геотекстиля. В данном случае между слоями грунта создаётся механический барьер, равномерно распределяющий нагрузку и минимизирующий деформации. Вертикальное размещение геотекстиля также обеспечило положительные результаты, однако показатели прогиба в этой конфигурации оказались несколько выше по сравнению с горизонтальной схемой. Тем не менее, оба метода подтвердили, что геотекстиль может быть надёжным и экономически целесообразным решением для обеспечения устойчивости склонов и откосов. Следует подчеркнуть, что применение геосинтетических материалов особенно эффективно в условиях строительства на орошаемых территориях, во влажных и слабоуплотнённых грунтах. Их использование способствует повышению устойчивости, снижению осадок и увеличению срока службы инженерных сооружений.

Список использованной литературы

1. Xasanov A.Z. and Xasanov Z.A. (2016) Engineering geology and soil mechanics. Samarkand. 118 pages.
2. Rowe, R.K. (2001). Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste. Geotextiles and Geomembranes, 19(8), pp.529–555. doi: https://doi.org/10.1016/S0266-1144(01)00003.
3. Bathurst, R.J. and Jarrett, P.M. (1988). Large-scale model tests of geogrid-reinforced soil retaining walls. Canadian Geotechnical Journal, 25(3), pp.549–564. doi: https://doi.org/10.1139/t88-061.
4. Palmeira, E.M. (2009). Soil-geosynthetic interaction: modelling and analysis. Geosynthetics International, 16(4), pp.316–331. doi: https://doi.org/10.1680/gein.2009.16.4.316.
5. Tatsuoka, F., Tateyama, M., Mohri, Y. and Koseki, J. (1997). New earth reinforcement method using soilbags. Geosynthetics International, 4(6), pp.701–731. doi: https://doi.org/10.1680/gein.1997.4.6.701.
6. Shukla, S.K. (2017). An Introduction to Geosynthetic Engineering. 2nd ed. CRC Press.
7. Bergado, D.T., Chai, J.C., Miura, N., Balasubramaniam, A.S. and Fannin, R.J. (1996). Geosynthetic-reinforced embankments on soft clay in Southeast Asia. Geotextiles and Geomembranes, 14(8), pp.643–674. doi: https://doi.org/10.1016/S0266-1144(96)00006-7.

8. Giroud, J.P. and Han, J. (2004). Design method for geogrid-reinforced unpaved roads. I. Development of design method. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(8), pp.775–786. doi: https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:8(775).
9. Holtz, R.D., Christopher, B.R. and Berg, R.R. (2008). Geosynthetic Design and Construction Guidelines. FHWA NHI-07-092. Federal Highway Administration.
https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/07092/07092.pdf
10. Liu, W., Li, H., Yang, Y., Xu, P., Dai, Z., Yang, G., Wang, H., & Wang, Z. (2023). Study on Improvement Characteristics of a Novel Geotextile with Stitched Transverse Ribs. Applied Sciences, 13(3), 1536. https://doi.org/10.3390/app13031536.

УДК 691.223.7

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ МЕЛКОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ В БЕТОННЫХ СМЕСЯХ

Тужилова Мария Валерьевна*, аспирант, **Баранов Дмитрий Сергеевич**, магистрант**, Лисятников Михаил Сергеевич**, к.т.н., доцент

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), tuzhilova.mar@yandex.ru

Аннотация. В статье представлен сравнительный анализ физико-химических и механических свойств речного кварцевого песка и отработанного формовочного песка (ОФП), используемых в производстве строительных материалов. Установлено, что кварцевый песок характеризуется высокой чистотой и стабильным гранулометрическим составом, что делает его предпочтительным для высокопрочных бетонов, тогда как ОФП содержит органические примеси и тяжелые металлы, требующие предварительной обработки. Несмотря на снижение прочностных характеристик, ОФП демонстрирует улучшенную адгезию в строительных смесях благодаря своей пористости, что позволяет использовать его в бетонах низких марок и дорожных покрытиях. Исследование подчеркивает потенциал ОФП как экологически устойчивой альтернативы, способствующей утилизации отходов литейного производства, при условии оптимизации методов его обработки.

Ключевые слова: кварцевый песок**,** отработанный формовочный песок, физические характеристики, рециклинг.

PHYSICO-CHEMICAL ANALYSIS OF VARIOUS TYPES OF FINE AGGREGATE IN CONCRETE MIXTURES

Tuzhilova Maria Valeryevna*, postgraduate student**, Baranov Dmitry Sergeevich,** Master's student**, Lisyatnikov Mikhail Sergeevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (Vladimir, Gorky St., 87, 600000, Russian Federation), tuzhilova.mar@yandex.ru

Abstract. The article presents a comparative analysis of the physico-chemical and mechanical properties of river quartz sand and spent molding sand (OFP) used in the production of building materials. It has been established that quartz sand is characterized by high purity and stable granulometric composition, which makes it preferable for high-strength concretes, whereas OFP contains organic impurities and heavy metals requiring pretreatment. Despite the reduced strength characteristics, OFP demonstrates improved adhesion in building mixes due to its porosity, which allows it to be used in low-grade concrete and road surfaces. The study highlights the potential of OFP as an environmentally sustainable alternative that promotes the disposal of foundry waste, while optimizing its treatment methods.
Keywords: quartz sand, spent molding sand, physical characteristics, recycling.

Введение

Современная строительная отрасль, являясь одним из крупнейших потребителей природных ресурсов и генераторов отходов, испытывает растущее давление со стороны экологических норм и общественности, что стимулирует поиск устойчивых и экологически безопасных решений [1, 2]. Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является эффективное использование промышленных отходов в качестве вторичного сырья для производства строительных материалов, в частности бетона. Среди множества промышленных отходов особое внимание привлекают отходы песчано-смоляных литейных форм, образующийся в огромных количествах при литье металлов [3, 4].

Речной песок, отличающийся высокой чистотой и стабильностью свойств, является важным сырьем для множества отраслей, таких как строительство, производство стекла и литейное дело (рис.1).



Рис. 1. Добыча речного песка

В то же время в литейной промышленности значительный интерес представляет отработанный формовочный песок (ОФП), который образуется в процессе создания и разрушения литейных форм. Этот материал представляет собой смесь кварцевого песка с различными добавками, включая бентонит, смолы и другие связующие вещества, подвергающиеся воздействию высоких температур и механических нагрузок во время литья.

Литье металлов — традиционный метод, широко используемый в различных отраслях, включая автомобилестроение, аэрокосмическую промышленность и производство деталей машин. Этот процесс обычно используется для литья чёрных металлов, таких как железо и сталь, а также цветных металлов, таких как латунь, бронза и т.д. Песок — основной материал, используемый для изготовления форм для литья под давлением [5]. Для получения необходимой детали создают нужную форму, путем прижатия двух платформ, верхней и нижней, заполненных песком, к твердому предмету из дерева, пластика или металла [6, 7], который является точной копией будущей детали. После завершения процедуры прессования платформы ненадолго разделяют, чтобы извлечь деталь, а затем соединяют снова, образуя единую форму с полостью внутри. Затем расплавленный металл заливается в форму, где он затвердевает. Затем форма с песком извлекается и разрушается механическим способом для последующего повторного использования. Песок измельчается и повторно используется в процессе литья до тех пор, пока его свойства не перестанут подходить для использования.

По данным современных исследований, объём этого отхода достигает порядка 100 миллионов тонн в год [8]. Ведь современное общество нуждается в большом количестве металлических деталей, изготовленных методом литья в песчаные формы, в результате чего образуется отход, известный как отработанный формовочный песок или отходы песчано-смоляных литейных форм (рис.2).

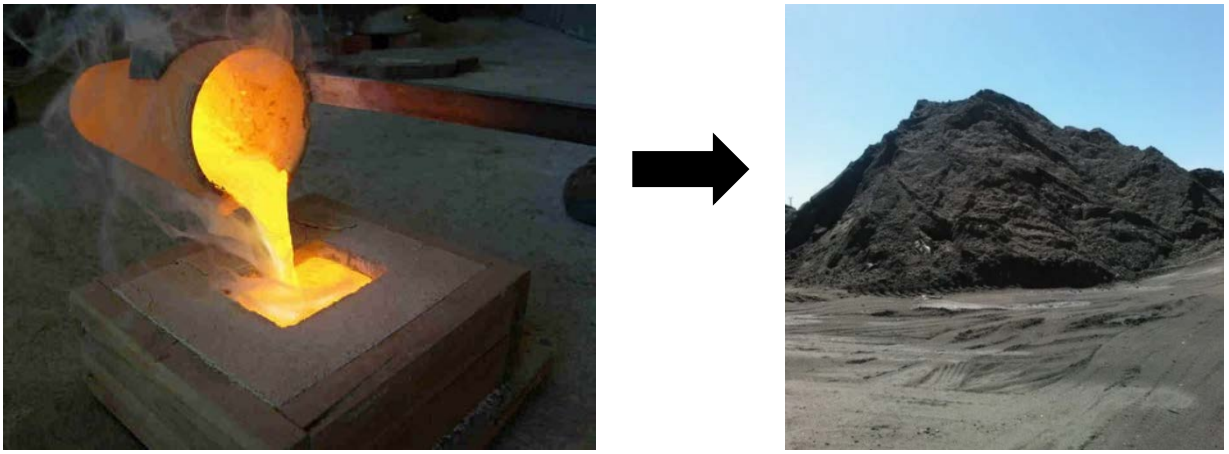


Рис. 2. Процесс образования отработанного формовочного песка

Утилизация отработанного формовочного песка на полигонах не только требует значительных экономических затрат, но и оказывает негативное воздействие на окружающую среду, загрязняя почву и водные ресурсы. В связи с этим, исследования, направленные на вовлечение отработанного формовочного песка в производство бетона, приобретают особую актуальность и практическую значимость, отвечая принципам циркулярной экономики и устойчивого развития [9].

Однако для реализации этого потенциала необходимо тщательно изучить различия между ОФП и чистым кварцевым песком, особенно в части их физико-химических характеристик. Целью данного исследования является сравнение этих материалов для определения их возможностей и ограничений в применении.

Материалы и методы

Сравнительный анализ физико-химических и механических свойств речного песка и отработанного формовочного песка (ОФП) выявил существенные различия, определяющие их применимость в строительной отрасли. Речной песок характеризуется высокой чистотой, однородным гранулометрическим составом и низким содержанием органических примесей, что делает его предпочтительным наполнителем для высокопрочных бетонов и растворов. В то же время ОФП отличается более широким диапазоном размеров частиц, повышенной пористостью и присутствием органических остатков, что снижает прочностные характеристики строительных смесей. Наличие тяжелых металлов в составе ОФП требует обязательной предварительной обработки для предотвращения экологических рисков. Несмотря на указанные недостатки, ОФП демонстрирует улучшенную адгезию в некоторых строительных смесях благодаря своей текстуре и пористости. Оптимальная обработка ОФП, включающая удаление органических примесей и стабилизацию химического состава, позволяет использовать его в качестве альтернативы речному песку в

производстве бетона низких марок, дорожных покрытий и других строительных приложений. Проведенные исследования показывают, что использование ОФП способствует снижению экологической нагрузки за счет утилизации отходов литейного производства. Однако для повышения эффективности применения ОФП необходимы дальнейшие исследования, направленные на оптимизацию методов его очистки и модификации. В частности, разработка технологий, обеспечивающих усиление адгезии между ОФП и цементной матрицей, а также снижение пористости, может значительно улучшить механические свойства получаемых материалов. Таким образом, выбор между речным песком и ОФП должен основываться на балансе между экологическими, экономическими и эксплуатационными факторами с учетом специфики конкретного применения.

Результаты и обсуждение

Сравнение физико-химических характеристик кварцевого песка и отработанного формовочного песка выявило существенные различия [12], которые представлены в таблице 1.

Таблица 1. Физико-химические характеристики кварцевого песка и отработанного формовочного песка

Параметр	Кварцевый песок	Отработанный формовочный песок
Содержание SiO_2, %	98,5 ± 0,4	91,8 ± 1,0
Содержание органических веществ, %	<0,1	3,8 ± 0,7
Средний размер частиц, мм	0,24 ± 0,04	0,32 ± 0,06
Плотность, г/см³	2,66 ± 0,03	2,57 ± 0,05
Пористость, %	37 ± 2	46 ± 3
Прочность на сжатие (с цементом), МПа	43 ± 3	34 ± 4
Содержание тяжелых металлов (Pb, Cd), мг/кг	<0,01	1,4 ± 0,4
Содержание примесей, %	0,5	

В кварцевом песке высокое содержание SiO_2, что подтверждает его пригодность для высокоточных применений, таких как производство стекла, тогда как в отработанном формовочном песке содержатся большое количество органических веществ и следов тяжелых металлов. Такой песок требует предварительной обработки перед использованием. Отработанный формовочный песок (ОФП) характеризуется более широким гранулометрическим составом и повышенной пористостью, что способствует улучшению адгезионных свойств в строительных смесях. Однако эти же характеристики могут приводить к снижению прочностных параметров материала. Данный эффект обусловлен присутствием органических остатков в составе ОФП, которые препятствуют формированию прочной связи между песком и цементной матрицей.

Наличие тяжелых металлов в ОФП подчеркивает необходимость проведения мероприятий по его обезвреживанию с целью минимизации риска загрязнения окружающей среды. При условии надлежащей обработки ОФП может использоваться в качестве альтернативы кварцевому песку в строительных приложениях, включая производство бетона низких марок и устройство дорожных покрытий.

Выводы

1. Сравнительный анализ кварцевого песка и отработанного формовочного песка (ОФП) показал, что ОФП обладает меньшей чистотой и универсальностью вследствие повышенного содержания органических примесей и тяжелых металлов. Тем не менее, при условии проведения соответствующей обработки ОФП может быть эффективно использован в строительной отрасли, что способствует снижению экологической нагрузки, связанной с утилизацией отходов литейного производства.
2. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку эффективных и экологически безопасных методов регенерации ОФП, а также на изучение его долгосрочного воздействия на окружающую среду при повторном использовании.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, госзадание ВлГУ).

Список использованной литературы

1. G. García, R. Cabrera, J. Rolon, R. Pichardo, C. Thomas Systematic review on the us of waste foundry sand as a partial replacement of natural sand in concrete. Construction and Building Materials. 2024. № 430. 136460.
2. García D. G. Effect of recycled foundry sand on the workability and mechanical properties of mortar / G. García Del Angel, J.A. Sainzaja, P. Tamayo, A. Cimentada, R. Cabrera, L.R. Pestana, C. Thomas // Applied Sciences (Switzerland). 2023. № 13. P. 1-21.
3. Awoyera P.O. The Use of Foundry Sand for Recycled Aggregate Concrete. In The Structural Integrity of Recycled Aggregate Concrete Produced with Fillers and Pozzolans / P.O. Awoyera, C. Thomas, M.S Kirgiz. // Civil and Structural Engineering; Woodhead Publishing. 2022. P. 3–24.
4. Kumar S. Insight into the perspectives of waste foundry sand as a partial or full replacement of fine aggregate in concrete / S. Kumar, R. Silori, S. Kumar Sethy // Total Environ. Res. Themes.2023. № 6. 100048.
5. García D. Á. G., Influence of partial and total replacement of used foundry sand in self-compacting concrete / G. García Del Ángel, A. Aghajanian, R. Cabrera, P. Tamayo, J.A. Sainz-aja, C. Thomas// Applied Sciences (Switzerland). 2023. № 13. P. 45-63.

6. Matos P.R. Applications of waste foundry sand in conventional and dry-mix concretes / P.R. de Matos, M.F. Marcon, R.A. Schankoski, L.R. Prudêncio // J. Environ. Manag. 2019. № 244. P. 294-303.

7. Mushtaq S.M. Experimental studies and drying shrinkage prediction model for concrete containing waste foundry sand / S.M. Mushtaq, R. Siddique, S. Goyal, K. Kaur// Clean. Eng. Technol. 2021. № 2. 100071.

8. Thiruvenkitam M. Use of waste foundry sand as a partial replacement to produce green concrete: mechanical properties, durability attributes and its economical assessment / M. Thiruvenkitam, S. Pandian, M. Santra, D. Subramanian // Environ. Technol. Innov.2020. № 19. 101022.

9. Reshma T.V. Effect of Waste Foundry Sand and Fly Ash on Mechanical And Fresh Properties Of Concrete / T.V. Reshma, M. Manjunatha, S. Sankalpasri, H.M. Tanu.// Materials Today: Proceedings. 2021. № 47. P. 3625-3632.

10. Garcia D. A. G. Siderurgical aggregate cement-treated bases and concrete using foundry sand / G. Garcia Del Angel, A. Aghajanian, P. Tamayo, J. Rico, C. Thomas // Applied Sciences (Switzerland).2021. № 11. P. 1-13.

11. Naila Hisbani, Nasir Shafiq, Muhammad Alamgeer Shams, Syed Ahmad Farhan, Muhammad Zahid. Properties of concrete containing crumb rubber as partial replacement of fine Aggregate—A review. Hybrid Advances.- Volume 10.- 2025.- 100481

12. M. Murali, B.S. Mohammed, I. Abdulkadir, M.S. Liew, W.S. Alaloul. Utilization of crumb rubber and high-volume fly ash in concrete for environmental sustainability: RSM-based modeling and optimization. Materials, 3322 (2021), p. 14, 10.3390

УДК 691.322.7

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗИНОВОЙ КРОШКИ В КАЧЕСТВЕ ЧАСТИЧНОЙ ЗАМЕНЫ МЕЛКОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ В БЕТОНЕ

Тужилова Мария Валерьевна*, аспирант, **Щеглова Полина Александровна** магистрант, **Лисятников Михаил Сергеевич**, к.т.н., доцент, **Рощина Светлана Ивановна,** д.т.н., профессор

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), tuzhilova.mar@yandex.ru

Аннотация: Рост населения и развитие промышленности привели к увеличению объемов отходов, которые создают экологические и экономические проблемы. Одновременно переработка природного песка для производства бетона усиливает нагрузку на природные ресурсы, вызывая деградацию окружающей среды. В этом контексте использование резиновой крошки, получаемой из переработки шин или других материалов, в качестве частичной замены мелкого заполнителя в бетоне становится перспективным направлением. Изучено влияния резиновой крошки на свойства свежего и затвердевшего бетона, включая удобоукладываемость, механические характеристики и долговечность.
Ключевые слова: рециклинг, резиновая крошка, бетон, конструкция, здания.

THE USE OF RUBBER CHIPS AS A PARTIAL SUBSTITUTE FOR FINE AGGREGATE IN CONCRETE

Tuzhilova Maria Valerievna*, Postgraduate Student**, Shcheglova Polina Aleksandrovna,** Master's Student**, Lisyatnikov Mikhail Sergeevich,** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor**, Roshchina Svetlana Ivanovna,** Doctor of Science, Professor

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (Vladimir, Gorky St., 87, 600000, Russian Federation), tuzhilova.mar@yandex.ru

Abstract: Population growth and industrial development have led to an increase in waste, which creates environmental and economic problems. At the same time, the processing of natural sand for the production of concrete increases the burden on natural resources, causing environmental degradation. In this context, the use of rubber chips obtained from recycling tires or other materials as a partial substitute for fine aggregate in concrete is becoming a promising direction. The effects of rubber chips on the properties of fresh and hardened concrete, including workability, mechanical characteristics and durability, have been studied.

Keywords: recycling, rubber chips, concrete, construction, buildings.

Введение

Рост населения привел к увеличению потребления автомобилей, что привело к увеличению производства шин. Ежегодно в мире образуется около 1 миллиарда отработанных шин [1,2]. При их изготовлении используется химический состав, который делает их не поддающимися биологическому разложению, что создает проблемы с утилизацией. Когда выброшенные шины скапливаются на открытых насыпях, возникают эстетические и экологические проблемы [3]. Многие исследования направлены на изучение остаточных свойств материалов и изучение рециклинговых ресурсов [4-6]. Ограниченное пространство на свалках ещё больше усложняет ситуацию, которая частично решается путём сжигания шин. Однако открытое сжигание является сложной задачей, так как для тушения пожара требуются значительные ресурсы. Пожарная безопасность является главной проблемой, так как сильные пожары из-за шин трудно контролировать. Кроме того, при сжигании шин образуется чёрный углеродный дым, в атмосферу выбрасываются вредные токсичные газы, что приводит к загрязнению воздуха. Также происходит загрязнение почвы и воды побочным продуктом – пиролитическим маслом [7].

Интересно сравнить предпочтения по способам утилизации шинных отходов в разных странах мира, а также долю перерабатываемых покрышек. Данные приведены за 2024 год (табл. 1) [8].

Таблица 1. Переработка и утилизация шин в разных странах

Страна	Объем образования шин, тыс.т	Вывезено на свалку,%	Получение энергии, %	Восстановление протектора, %	Получение резиновой крошки, %	Экспорт, %	Прочее, %
Германия	5820	0	36,4	12,9	34,5	14,4	1,7
Великобритания	5270	4,6	35,5	7,4	39,5	5,5	7,6
Италия	4210	0	55,6	6,7	28,5	4,0	5,2
Франция	4570	0	49,7	7,7	27,4	10,9	4,4
США	40390	12,1	47,6	2,6	32,1	2,5	3,1
Япония	10000	7,8	64,3	5,6	10,5	11,5	0,3
Россия	32400	51,2	10,1	23,4	5,9	3,7	5,7

Помимо решения проблемы утилизации отходов от переработки шин, использование резины в качестве частичной замены мелкого заполнителя становится всё более актуальным в связи с глобальным истощением запасов природного речного песка. Чрезмерная добыча песка для производства бетона привела к серьёзным экологическим и экономическим последствиям, что побуждает к поиску устойчивых альтернатив. В этом контексте резиновые

отходы не только способствуют переработке отходов по замкнутому циклу, но и являются потенциальным решением проблемы истощения запасов обычных заполнителей.

Учитывая проблемы, связанные с утилизацией отработанных шин, и другие социально-экономические вопросы, необходимо разработать методы повторного использования или переработки шин. Строительная отрасль начала уделять внимание использованию резины из отработанных шин для обеспечения экологичности своей деятельности [9]. Шины состоят из резины, стальной проволоки и текстиля. Для повторного использования шины измельчают до размера природных заполнителей (рис. 1).



Рис.1. Измельчение отработанных автомобильных шин до размера природных заполнителей

Использование измельчённой или гранулированной резины в качестве частичной замены природных заполнителей при производстве бетона даёт двойную экологическую выгоду. Измельчение изношенных шин (рис. 2) является безвредным и рациональным способом переработки. При измельчении сохраняются все химические и физико-механические свойства материала.

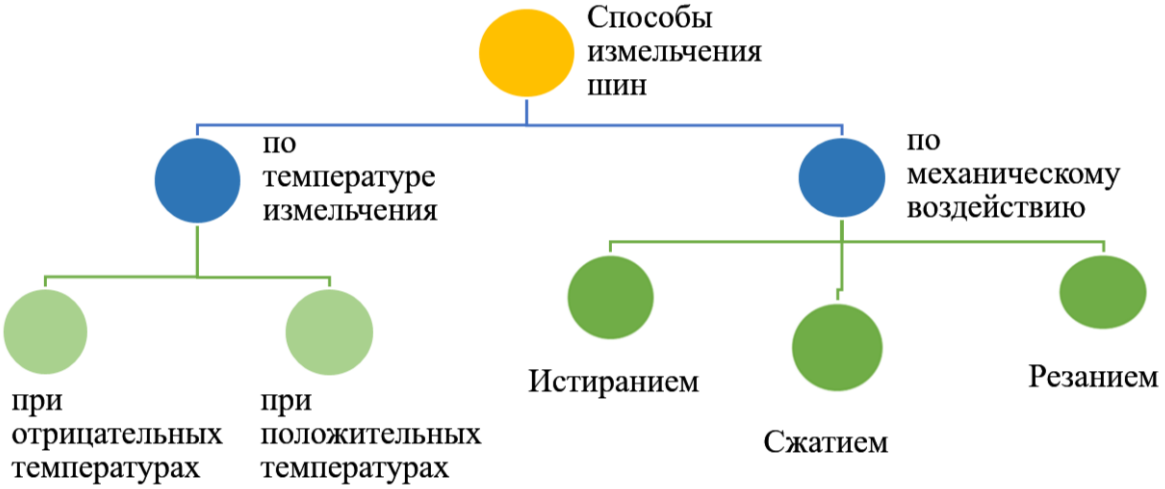


Рис.2. Способы измельчения отработанных шин

Такой подход не только позволяет использовать значительные объёмы отработанных шин вместо того, чтобы отправлять их на свалку, но и снижает зависимость от ограниченных природных ресурсов, таких как речной песок [10].

Целью данного обзора является систематический анализ и обобщение современных научных данных о влиянии необработанной резиновой крошки из отработанных шин, используемой в качестве частичной замены мелкого заполнителя, на свойства и характеристики бетона.

Методы

Для анализа были собраны данные из научных статей в базах Scopus и ScienceDirect. Отобранные публикации были подвергнуты сравнительному анализу. Для каждого исследуемого параметра (удобоукладываемость, прочность на сжатие и т.д.) данные из отобранных источников сводились в обобщающие таблицы. На основе сравнительного анализа и выявления согласованных тенденций формулировались обобщенные выводы.

Результаты и обсуждение

Анализ профильной научно-технической литературы свидетельствует, что силикатные отходы в бетоне используются для частичной замены крупнозернистых заполнителей и песка. В зависимости от размера выделяют три типа резиновых частиц (табл.2) [11].

Таблица 2. Типология силикатных отходов по размерам

Название	Размеры	Заменитель
Измельчённая резина	13–76 мм	Замена крупных заполнителей
Силикатная крошка	0,075 до 4,75 мм	замена песка
-	0,15 до 19 мм	замена песка

В исследовании [12], производители бетона добавляли силикатную крошку в цементные смеси. Крошка из резины получается путём удаления стальной проволоки из отработанных шин, последующего измельчения и гранулирования для получения мелких частиц резины и, наконец, смешивания частиц со связующими веществами. Бетон, в котором в качестве частичной замены песка используется крошка из резины, называется силикатобетоном [13]. Крошка из резины привлекает значительное внимание как экологичная альтернатива песку в качестве мелкого заполнителя. Однако одним из существенных недостатков является снижение прочности бетона. Исследования связывают эту проблему со слабой связью между силикатной крошкой и цементным композитом. Исследователи изучали различные подходы к устранению этого недостатка, включая дополнительные добавки, такие как летучая зола и нанокремний [14].

Предыдущие исследования резиновых крошек в составе бетона были посвящены их использованию в качестве мелкого и крупного заполнителя

[15], а также изучению обработанных и необработанных резиновых крошек [16]. В то время как некоторые исследования были сосредоточены на специализированных типах бетона, таких как самоуплотняющийся бетон [17], в этом обзоре рассматривается использование необработанных резиновых крошек в качестве частичной замены мелкого заполнителя в обычном бетоне. Основное внимание уделяется оценке их влияния на ключевые показатели, в том числе на удобоукладываемость, механическую прочность и долговечность.

Основное внимание при аналитических обобщениях уделялось исследованиям, посвященным использованию силикатной крошки в качестве частичной замены мелкого заполнителя в обычном бетоне. Рассматривались такие параметры, как удобоукладываемость, механические свойства (прочность на сжатие, растяжение, изгиб, модуль упругости) и показатели долговечности (водопоглощение, сопротивление кислотной коррозии, абразивная стойкость) (табл. 3).

Таблица 3. Характеристики бетона с добавлением силикатной крошкой

Параметр	Характеристика
Удобоукладываемость	При замене песка на силикатную крошку в объеме от 0% до 30% осадка конуса уменьшалась с 40 мм до 30 мм. Это обусловлено повышенным трением между частицами отхода и другими компонентами смеси, а также увеличением содержания воздуха из-за пористой структуры материала. Исследования показали, что при замене 20% песка осадка конуса снижалась на 15–25% по сравнению с контрольным образцом, а при 30% замене требовалась механическая вибрация для заполнения форм. Кроме того, силикатная крошка обладает гидрофобными свойствами, что приводит к увеличению водоцементного отношения и дополнительно снижает текучесть смеси.
Плотность	Замена 30% песка на силикатную крошку снижала плотность смеси примерно на 5–7%, что объясняется меньшей удельной плотностью отхода и склонностью материала удерживать воздух. Эти свойства делают бетон менее удобным для укладки, но могут быть полезны, где требуется снижение веса конструкции.
Прочность на сжатие	Исследования показывают, что при содержании силикатной крошки 10–40% прочность на сжатие уменьшается на 10–50% после 28 дней твердения. Например, при 40% замене прочность снижалась до 85% от контрольного образца. Это связано с низким модулем упругости крошки и слабой межфазной связью, что приводит к образованию микротрещин в структуре бетона.
Прочность на растяжение и изгиб	При 20% замене снижение прочности на растяжение составляло 15–30%, а при 40% — до 50%. Однако высокая пористость силикатной крошки способствует улучшению пластичности и поглощения энергии, что делает бетон с отходом подходящим для конструкций, где важна устойчивость к динамическим нагрузкам, например, в дорожных покрытиях или шумозащитных барьерах. Оптимальное содержание силикатной крошки (5–15%) позволяет минимизировать потери прочности при сохранении экологических преимуществ.

Продолжение таблицы 3

Долговечность	Долговечность бетона с отходом шин зависит от его пористости и качества межфазной зоны между крошкой и цементным тестом. Повышенная пористость приводит к увеличению водопоглощения, что негативно сказывается на устойчивости к замораживанию-оттаиванию и хлоридной пенетрации. Исследования показывают, что при 20% замене водопоглощение увеличивается на 10–15%, а проницаемость для хлоридов возрастает, что ограничивает применение такого бетона в агрессивных средах.

Использование силикатной крошки в качестве частичной замены мелкого заполнителя представляет собой экологичный подход к производству бетона. Существует возможность снижения нагрузки на окружающую среду, связанной с утилизацией на свалках отработанных шин, при сохранении природных ресурсов песка.

Выводы

1. Использование резиновой крошки из переработанных шин как частичной замены мелкого заполнителя в бетоне представляет собой перспективное решение экологических и экономических проблем, связанных с утилизацией отходов и истощением природных ресурсов. Основная идея исследования — снижение нагрузки на окружающую среду за счёт рециклинга шин и уменьшения добычи песка.
2. Анализ показал, что замена 0–30% песка снижает удобоукладываемость (осадка конуса падает на 15–25% при 20% замене), плотность (на 5–7%) и прочность на сжатие (на 10–50% при 10–40% замене), что связано с гидрофобностью крошки и слабой межфазной связью. Долговечность ухудшается из-за роста водопоглощения на 10–15%, ограничивая применение в агрессивных средах.
3. Сравнение мировых практик выявило низкий уровень переработки шин в России (5,9% против 39,5% в Великобритании), что указывает на потенциал внедрения зарубежного опыта. Оптимальное содержание крошки (5–15%) делает резинобетон пригодным для конструкций с низкими требованиями к прочности, таких как тротуарные плиты.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, госзадание ВлГУ).

Список использованной литературы

1. Иванков С. И. Рациональные запатентованные технологии переработки и утилизации твердых промышленных отходов / С. И. Иванков, Л. Я. Шубов, А. В. Троицкий [и др.] // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2022. – № 2. – С. 3-103.

2. N. Hisbani, N. Shafiq, M. Alamgeer Shams, S. A. Farhan, M. Zahid. Properties of concrete containing crumb rubber as partial replacement of fine Aggregat. Hybrid Advances. -2025. - №10. - Pp.256-267.

3. M. Murali, B.S. Mohammed, I. Abdulkadir, M.S. Liew, W.S. Alaloul. Utilization of crumb rubber and high-volume fly ash in concrete for environmental sustainability: RSM-based modeling and optimization. Materials.- 2021.- № 3322.- Pp. 14-32.

4. Лукин М. В. Остаточный ресурс утеплителя стен незавершенного строительством зданий после длительного воздействия неблагоприятных климатических факторов / М. В. Лукин, М. С. Лисятников, С. И. Рощина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2023. – № 6(774). – С. 110-118.

5. Римшин В. И. Повышение энергоэффективности вспомогательных зданий текстильной промышленности за счет продления цикла жизнедеятельности сборных композитных стеновых панелей / В. И. Римшин, М. В. Лукин, Д. В. Рева, С. И. Рощина // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2023. – № 6(408). – С. 203-213.

6. Шишов И. И. Совместное деформирование железобетонного ригеля с колоннами в покрытии одноэтажного промышленного здания / И. И. Шишов, М. С. Сергеев, М. С. Лисятников [и др.] // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 3(101). – С. 75-86.

7. B.S. Thomas, R.C. Gupta, V.J. Panicker. Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance. J. Clean. Prod.- 2016.-№ 112.-Pp. 504-513.

8. Q.H. Lương, H.H. Nguyễn, J. il Choi, H.K. Kim, B.Y. Lee. Effects of crumb rubber particles on mechanical properties and sustainability of ultra-high-ductile slag-based composites. Constr. Build. Mater.- 2021.-№ 272.- Pp. 52-64.

9. B.S. Mohammed, M.S. Liew, W.S. Alaloul, A. Al-Fakih, W. Ibrahim, M. Adamu. Development of rubberized geopolymer interlocking bricks. Case Stud. Construction Mater.-2018.- № 8.- Pp. 401-408.

10. Y. Zhao, X. Chen, Z. Wang, Y. Zhang, Y. Leng. An experimental study on the influence of fly ash and crumb rubber on the mechanical property and permeability of Engineered Cementitious Composite (ECC). J. Build. Eng.- 2023.- № 76.- p. 106998-107007.

11. R. Loganathan, B.S. Mohammed. Properties of rubberized engineered cementitious composites containing nano-silica. Materials.- 2021.- № 3765.- Pp. 14-21.

12. I. Abdulkadir, B.S. Mohammed. Rsm analysis and study on the 6 Months compressive strength development and Shrinkage behaviour of high volume fly ash rubberized ECC (HVFA-RECC). Int. J. Adv. Res. Eng. Technol.-2020.-№ 11 (9).- Pp. 89-101.

13. Y. Li, J. Chai, R. Wang, Y. Zhou, X. Tong. A review of the durability-related features of waste tyre rubber as a partial substitute for natural aggregate in concrete. Buildings.- 2022.- №12 (11).- Pp. 1975-1989.

14. B.S. Mohammed, M. Adamu. Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica. Construction Build. Mater.- 2018.- № 159.- Pp. 234-251.

15. F. Ren, J. Mo, Q. Wang, J.C.M. Ho. Crumb rubber as partial replacement for fine aggregate in concrete: an overview. Constr. Build. Mater.- 2022.- № 343.- Pp.- 36-44.

16. Y.J. Zrar, K.H. Younis. Mechanical and durability properties of self-compacted concrete incorporating waste crumb rubber as sand replacement: A review. Sustainability.-2022.- №14 (18).- Pp.635-642.

17. A. Alsaif, A. Albidah, A. Abadel, H. Abbas, Y. Al-Salloum. Development of metakaolin-based geopolymer rubberized concrete: fresh and hardened properties. Arch. Civ. Mech. Eng.- 2022.- № 22 (3).- Pp. 147-154.

УДК69.001.5

НЕСУЩИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ИЗ ДПК: ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Усов Алексей Сергеевич*, аспирант, ассистент кафедры строительных конструкций, **Лисятников Михаил Сергеевич**, к.т.н., доцент, **Стрекалкин Антон Андреевич**, магистрант кафедры строительных конструкций, **Рощина Светлана Ивановна**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой строительных конструкций

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87,600000, Российская Федерация), usovlexx@mail.ru

Аннотация. Древесно-полимерный композит (ДПК) – относительно молодой строительный материал. Широкое применение данного материала началось примерно 20 лет назад. Основная область применения – отделочные материалы (террасная доска, фасадные панели). Главными преимуществами ДПК являются: долговечность, устойчивость к внешним воздействиям, экологичность. Также нельзя не отметить, что при производстве ДПК используются отходы производств древесины. Часть пластика может быть использована после переработки. После окончания срока службы изделия из ДПК можно подвергнуть вторичной переработке. ДПК прошёл путь от экспериментального материала до востребованного продукта в строительстве. Его развитие продолжается, и в будущем он может стать ещё более экологичным и функциональным. Одно из перспективных направлений

использования ДПК – несущие конструкции. В данной статье произведен обзор современных мировых исследований на данную тему.
Ключевые слова: древесно-полимерный композит; несущие конструкции; «зеленое» строительство; композитные материалы; экономика замкнутого цикла.

WPC LOAD-BEARING BUILDING STRUCTURES: TRENDS AND PROSPECTS

Usov Alexey Sergeevich*, postgraduate student, Assistant of the Department of Building Structures, **Lisyatnikov Mikhail Sergeevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, **Strekalkin Anton Andreevich**, Master's student of the Department of Building Structures, **Roschina Svetlana Ivanovna**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Structures

Vladimir State University named after Alexander and NikolayStoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), usovlexx@mail.ru

Abstract. Wood-polymer composite (WPC) is a relatively young building material. This material began to be widely used about 20 years ago. The main area of application is finishing materials (decking, facade panels). The main advantages of WPC are: durability, resistance to external influences, environmental friendliness. It should also be noted that wood waste is used in the production of WPC. Some of the plastic can be used after recycling. After the end of its service life, WPC products can be recycled. WPC has gone from an experimental material to a popular product in construction. Its development continues, and in the future, it can become even more environmentally friendly and functional. One of the promising areas of use of WPC is load-bearing structures. This article provides an overview of modern world research on this topic.
Keywords: wood-polymer composite; load-bearing building structures; green building; composite materials; cyclic economy.

Введение

Строительство – ведущая область экономики, оказывающая значительное экологическое, социальное, стратегическое и экономическое воздействие на общество. Считается, что строительная отрасль в России вносит около 5% в валовой внутренний продукт (ВВП) и обеспечивает более 11 миллионов рабочих мест. Благодаря развитию технологий строительство стало более быстрым, точным и экономичным, что приводит к совершенствованию образа жизни человека, закрытию базовых потребностей и возможности реализации в различных сферах [1].

Древнейшим и самым распространённым строительным материалом в мире является древесина. Древесина обладает хорошим физико-механическими и эстетическими качествами, однако производство древесных

материалов не считается простым и дешевым, так как процесс изготовления сырья из природных материалов включает много случайных факторов, сложно поддающихся предварительному учету и планированию, что приводит к получению большого количества брака или вторсырья [2].

За последние 25 лет количество лесозаготовительных фирм в России сократилось примерно в 2–3 раза (с ~6–7 тыс. в 2000 до ~2–3 тыс. в 2024). Введение лесной сертификации, изношенное и устаревшее оборудование, устаревшие производственные процессы, отсутствие планирования и программы совершенствования производства, а также многие другие факторы отрицательно влияют на итоговую стоимость продукции, а из-за высокой стоимости снижается конкурентоспособность компании, что в свою очередь приводит к ее закрытию. Одним из решений данной проблемы является переход компании на экономику замкнутого цикла, которая базируется на принципах минимизации отходов, многократного использования ресурсов и создания устойчивых производственных циклов. В отличие от традиционной линейной модели, она направлена на сокращение потребления первичных ресурсов и снижение экологического ущерба.

По статистическим данным, в России зарегистрировано более 2000 деревообрабатывающих производств. В сумме данные предприятия ежегодно образуют около 68-74 млн. $м^3$ древесных отходов, и лишь 23% из них перерабатывается, а 77% подлежит утилизации [3].

Проблема масштабируется из года в год, причем изготовители признают, что основным фактором отсутствия программ по переработке древесных отходов является отсутствие спроса на такой материал, что можно связать с отсутствием знаний и инвестиций в разработку подобных проектов. В современных условиях крайне важно формировать ответственное отношение к окружающей среде, соответствовать современным экологическим нормам и развивать проекты применения вторсырья для производства строительных материалов. Одним из таких направлений может стать изготовление древесно-полимерных композитов.

Историческая справка

Древесно-полимерный композит (ДПК, дерево-пласт, «жидкое дерево») — современный композитный материал, состоящий из трех основных компонентов: частиц измельченной древесины, термопластичного полимера (чаще всего поливинилхлорид (ПВХ), полиэтилен (ПЭ) или полипропилен (ПП)), а также химических добавок (до 5%) (рис. 1). Все составляющие ДПК соединяются в нужных пропорциях и перемешиваются между собой. Меняя отношение компонентов к общему объему материала, можно получать более выраженные те или иные свойства исходных материалов. Процесс получения изделия из данного материала связан с нагревом смеси и дальнейшей ее формовкой (прессование или экструдированние в зависимости от выбранной технологии) [4]. В итоге получается древесиносодержащий материал, избавленный от многих отрицательных свойств древесины. ДПК часто путают

с древесными композитами (ДК), однако это разные материалы, хотя оба используют древесину в качестве основного компонента. Древесные композиты могут быть сделаны из различных типов древесных волокон или плит, склеенных вместе (например, ДСП, МДФ, фанера), а ДПК содержит полимерную матрицу, что обеспечивает ему лучшие влагостойкость и устойчивость к биологическому воздействию, чем у обычных древесных композитов [5].



Рис. 1. Продукция из ДПК (https://www.v-hold.ru).

С XIX века ученые пытались получить композитный материал на основе древесины при добавлении полимерной массы. В 1930–1940-х годах предпринимались попытки комбинировать древесину с синтетическими смолами (например, фенолформальдегидными) для создания прочных плит. Однако эти материалы были дорогими и использовались только в специализированных областях (авиация, военная промышленность). В 1950–1960-х в Италии и Германии разрабатывались древесно-смоляные композиты на основе фенольных и мочевиноформальдегидных смол. Они применялись в мебели и строительстве, но имели ограниченную устойчивость к влаге и выделяли вредные вещества. В 1960-х в США начались эксперименты с древесно-пластиковыми смесями, но из-за плохой адгезии между древесиной и полимерами материал получался хрупким. В 1974 году итальянская компания ICMA San Giorgio запатентовала технологию производства ДПК-профилей методом экструзии и создала торговую марку Wood-Stock (рис. 2). Первый опыт был не слишком удачным - спрос на новый материал оказался

незначительным, а износ технологического оборудования высоким. Только в 1990-х годах, одновременно в Финляндии, Швеции, Германии, Италии, Голландии, Японии и США возобновились разработки в области создания ДПК. Спрос на древесно-полимерные композиты был вызван потребностью в деталях для автомобильной промышленности, обладающих высокой прочности [6].



Рис. 2. Офис компании ICMA San Giorgio (https://avexx.ru/icma-san-giorgio).

С середины 90-х годов прошлого столетия произошло расширение сфер применения ДПК. Статистика показывает, что основным сектором, в котором на данный момент применяются ДПК, является строительная отрасль (76% от общей массы). В строительстве ДПК в основном используются в качестве напольных покрытий, ограждений и облицовки фасадов.

Производство ДПК в настоящее время считается одним из самых динамичных и быстрорастущих секторов деревообрабатывающей промышленности. Тенденция в производстве ДПК стремительно растет, в 2020 году в Европе было произведено 220 000 тонн, а в 2024 году эта мощность выросла до 260 000 тонн. Прогнозируется, что спрос на продукцию из ДПК и пластиковой древесины в США и Европе будет расти на 6,9% в год, что к 2030 году приведет к обороту 5,9 млрд долларов [7].

ДПК прошёл путь от экспериментального материала до востребованного продукта в строительстве и промышленности. Его развитие продолжается, и в

будущем он может стать ещё более экологичным и функциональным. Рассмотрим возможность применения ДПК в качестве конструкционного материала.

ДПК как конструкционный материал

Совокупность высоких механических характеристик и малого удельного веса является залогом успеха современного конструкционного материала и определяет его высокую востребованность в строительстве.

Современные методы расчета строительных конструкций выполняются согласно методу предельных состояний. Нормативные сопротивления материалов наряду с нормативными нагрузками являются определяющими величинами в расчете по методу предельных состояний. Нормативное сопротивление материала, используемое в расчетных формулах строительных конструкций, напрямую связано с его модулем упругости. Высокий модуль упругости означает, что материал менее подвержен деформациям под нагрузкой, и, соответственно, его нормативное сопротивление (нагрузка, которую он может выдержать до начала разрушения) будет выше. Таким образом мы можем сделать заключение, что современный конструкционный материал должен обладать малой плотностью при высоком модуле упругости.

В рамках данной работы были проанализированы прочностные характеристики различных конструкционных материалов. Было определено, что прочность на изгиб современных неармированных элементов из ДПК для цельных профилей может достигать 9,8МПа, а для пустотелого профиля – 19,2МПа. Модуль упругости (модуль Юнга) цельного профиля достигает 1,2ГПа, пустотелого – 2,6ГПа. Оба данных значения ниже, чем у самой распространенной в строительной области древесины Сосны, который составляет для изгиба 10ГПа [8]. Современные исследования показывают, что можно добиться значения модуля упругости около 8,6ГПа и предела прочности на изгиб до 109МПа при мерсеризации компатибилизатора MAPP на композиты с использованием матрицы из полипропилена. На данный момент разработаны только математические модели, коммерческого продукта широкому рынку еще не представлено [9].

Также ведутся работы по созданию конструкций из ДПК, армированными разнообразными материалами. Ученые из Южно-Китайского технологического университета провели исследования с плитами из ДПК, усиленными углеродной сеткой (рис. 3). Они выполнили аналитические расчеты, а также создали уникальную линию для создания данной продукции и провели ряд опытов с масштабными моделями (рис. 4). Полученные конструкции показали значение прочности на изгиб в среднем 89МПа, а модуль упругости при опытах с различной температурой достигал 25ГПа [10]. Их коллеги из Южно-Китайского сельскохозяйственного университета (Гуанчжоу) провели ряд опытов с плитами из ДПК, усиленными стекловолоконной арматурой и деревянными балками (С-ДПК). Натурные испытания показали значения прочности на изгиб около 422 МПа, при этом

модуль упругости достигал 9,6 ГПа [11]. Ученые из Нанкинского университета (Китай) провели ряд исследований с балками из алюминиевого профиля, покрытого слоем ДПК. Исследователями были проведены испытания 3 видов балок (разного отношения высоты к пролету) на четырехточечный изгиб. Эквивалентный модуль упругости данных балок, согласно аналитическому расчету равен 34,39 ГПа [12].

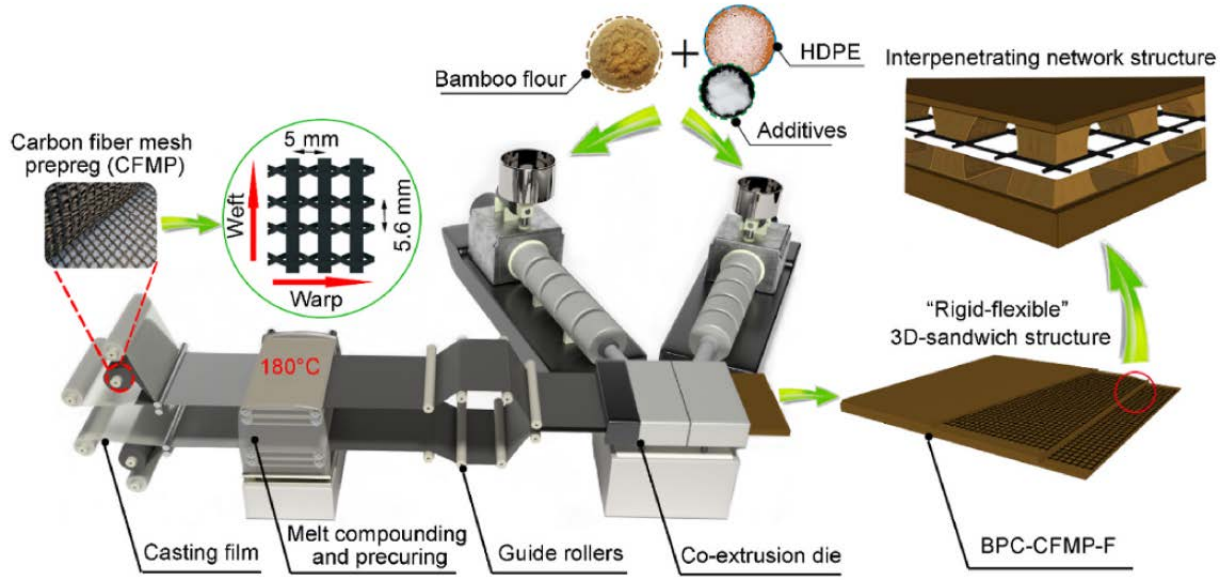


Рис. 3. Схема разработанной линии производства BPC-CFMP [10].

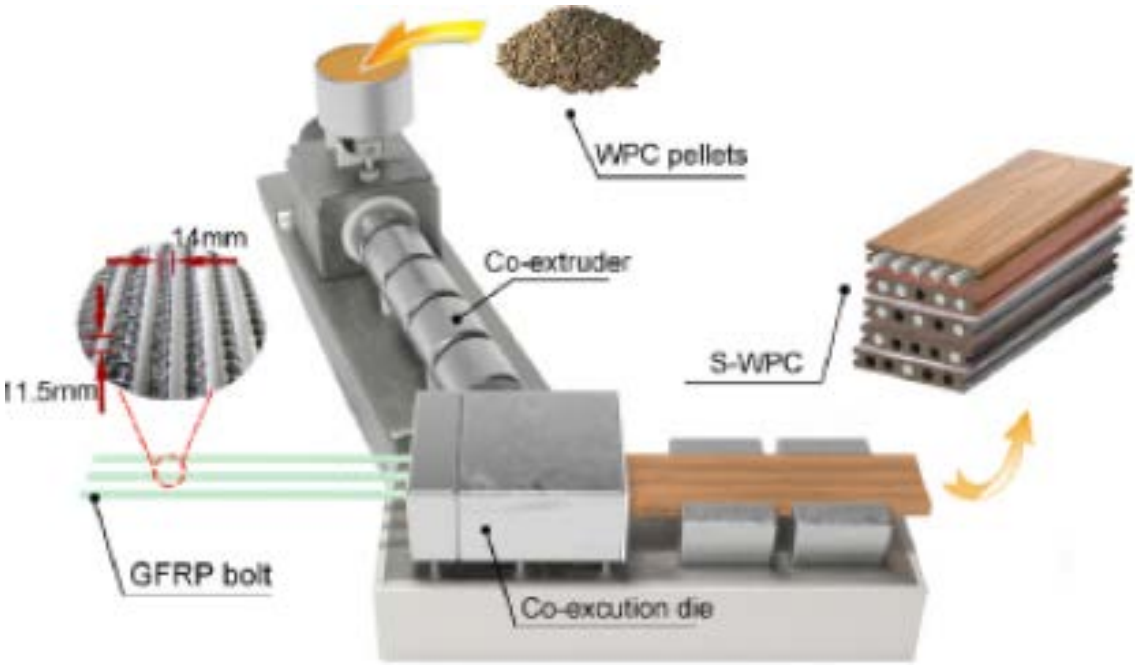


Рис. 4. Схема разработанной линии производства S-WPC [11].

Выводы

В данной статье приведен краткий обзор современных тенденций в сфере применения древесно-полимерных композитов в качестве строительных материалов. На текущий момент ДПК используются в качестве отделочных материалов, однако современные технологии обработки и производства могут обеспечить данным композитам и его модификациям выход на новый уровень реализации, что обеспечит необходимость развития процессов грамотной переработки отходов лесной и сельскохозяйственной промышленности. Новейшие научные исследования направлены на решение вопросов внедрения изделий из древесно-полимерных композитов в различных областях с учетом применимости ведущих качественных характеристик полученных изделий.

Из приведенной информации можно сделать вывод, что при должной технологии элементы из ДПК могут выполнять роль несущих конструкций наравне с древесиной, а по определенным параметрам и превосходить ее. А принимая во внимание фактор создания материала из вторсырья, а также возможность вторичной переработки композитов для повторного применения (что обеспечивает принцип сохранности ресурсов и минимизации отходов), вопрос изучения возможностей применения ДПК становится еще более острым.

Список использованной литературы

1. Li C. Z., Tam V. W., Lai X., Zhou Y., Guo S. Carbon footprint accounting of prefabricated buildings: A circular economy perspective //Building and Environment. 2024. Т. 258. С. 111602. DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111602.

2. Kristak L, Kubovský I, Réh R. New Challenges in Wood and Wood-Based Materials. Polymers. 2021. Vol. 13(15). Article No. 2538.

3. Говядин И.К., Чубинский А.Н. Исследование свойств древесно-полимерного композита на основе PLA // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 129–145.DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-129-145.

4. Hao X., Xu J., Zhou H., Tang W., Li,W., Wang Q., Ou R. Interfacial adhesion mechanisms of ultra-highly filled wood fiber/polyethylene composites using maleic anhydride grafted polyethylene as a compatibilizer //Materials & Design. 2021. Т. 212. С. 110182. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.110182.

5. Хантимиров А. Г., Абдрахманова Л. А., Низамов Р. К., & Хозин В. Г. Древесно-полимерные композиты на основе поливинилхлорида, усиленные базальтовой фиброй //Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. №. 3 (61). С. 75-81. DOI: 10.52409/20731523-2022-3-75.

6. Mitaľová Z., Litecká J., Kočiško M., Berladir K. Technologies of Production of Materials Based on WPC: A Short Review //Polymers. 2025. Т. 17. №. 8. С. 1025. DOI:10.3390/polym17081025.

7. Spear M. J., Eder A., Carus M. Wood polymer composites //Wood composites. – Woodhead Publishing, 2015. – С. 195-249. DOI:10.1016/B978-1-78242-454-3.00010-X.
8. Naghipour M., Nematzadeh M., Yahyazadeh Q. Analytical and experimental study on flexural performance of WPC–FRP beams //Construction and Building Materials. 2017. Т. 25. №. 2. С. 829-837. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.104.
9. Yang A. et al. Scalable production of robust and creep resistant ultra-high filled wood-plastic composites //Composites Part B: Engineering. 2025. Т. 289. С. 111937. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111937.
10. Chen L. et al. Constructing a rigid-flexible grid structure for simultaneously strengthening and toughening bamboo flour/plastic composites through the introduction of continuous carbon fabric meshes via multi-layer co-extrusion // Composites Science and Technology. 2023. Т. 242. С. 110204. DOI: 10.1016/j.compscitech.2023.110204.
11. Chen L., Gao F., Liu J., Li D., Chen D., Li Y., Wang Q. Enhancing wood-plastic composites for high-performance structural applications // Composites Part B: Engineering, 2025. 299. С. 112410. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.112410.
12. Zhao L., Fei Xi D. Flexural performance of reinforced aluminum–wood–plastic composite beam: An experimental and numerical investigation // Thin-Walled Structures. 2022. Т. 180. С. 109910. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109910.

УДК 691.11

РАСЧЕТ КЛЕЕНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ БАЛОК С ПЕРЕКРЕСТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫМИ СЛОЯМИ В ПК «ЛИРА»

Фадеев Роман Николаевич*, аспирант, **Лисятников Михаил Сергеевич**, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций, **Рощина Светлана Ивановна**, д.т.н., профессор, заведующая кафедры строительных конструкций

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), romazatti@yandex.ru

Аннотация. В предложенной статье рассматривается расчет 3х-метровых клееных деревянных балок с перекрестно-ориентированными слоями в программном комплексе Лира 10. При выполнении расчета производится сравнение клееных деревянных балок, изготовленных только из продольных ламелей, с балками с перекрестно-ориентированными слоями. По результатам расчета нормальные напряжения балок с применением перекрестно-ориентированных слоев выросли на 36,6 %. Деформации узлов балок с перекрестными слоями выросли на 31,1 % по сравнению с балками из продольносклееных слоев. Производился анализ применения клееных деревянных балок пролетами 3, 6 и 9 м для чердачных перекрытий, междуэтажных перекрытий жилых помещений и междуэтажных перекрытий офисных помещений. По результатам анализа предельные деформации 3х-метровых балок с перекрестно-ориентированными слоями, ограничивающиеся согласно СП 20.13330.2016 деформацией в 1/150 пролета (20 мм для пролета 3 м), достигаются при шагах балок 6 и 9 м для междуэтажных перекрытий офисных помещений и при пролете 6 м междуэтажных перекрытий жилых помещений. При аналогичных нагрузках предельные деформации 3х-метровых балок без перекрестных слоев достигаются только при шаге балок 6 и 9 м для междуэтажных перекрытий офисных помещений.
Ключевые слова: клееные деревянные балки; перекрестно-ориентированная древесина; расчет конструкций.

CALCULATION OF GLUED WOODEN BEAMS WITH CROSS-ORIENTED LAYERS IN THE LIRA PC

Fadeev Roman Nikolaevich*, postgraduate student**, Lisyatnikov Mikhail Sergeevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures, **Roshchina Svetlana Ivanovna**, D.Sc., Prof., Head of the Department of Building Structures

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), romazatti@yandex.ru

Abstract. The proposed article discusses the calculation of 3-meter glued wooden beams with cross-oriented layers in the software package Lira 10. When performing the calculation, glued wooden beams made only from longitudinal lamellae are compared with beams with cross-oriented layers. According to the calculation results, the normal stresses of beams using cross-oriented layers increased by 36.6%. Deformations of beam assemblies with cross layers increased by 31.1% compared with beams made of longitudinally glued layers. The analysis of the use of glued wooden beams with spans of 3, 6 and 9 m for attic floors, floor-to-floor ceilings of residential premises and floor-to-floor ceilings of office premises was carried out. According to the results of the analysis, the maximum deformations of 3-meter

beams with cross-oriented layers, limited according to SP 20.13330.2016 to a deformation of 1/150 of the span (20 mm for a span of 3 m), are achieved with beam steps of 6 and 9 m for floor-to-floor.
Keywords: glued wooden beams; cross-oriented wood; calculation of structures.

Введение

Расчет конструкции является важной частью численных исследований. В настоящее время существует довольно большой выбор программных комплексов, позволяющих производить теоретическую часть исследований. Расчет прочности конструкций при помощи программных комплексов широко распространен в различных отраслях производства [1]. Среди наиболее распространенных программных комплексов можно выделить следующие: Лира, Лира-САПР, Scad, Ansys, ABAQUS и др. [2-3]. Применение программных комплексов при расчете строительных конструкций требует и обновления нормативной документации [4].

В данном исследовании для расчета клееных деревянных балок применялся ПК Лира 10. В исследовании предлагается рассмотреть возможность расчета клееных деревянных балок с продольно-склеенными и перекрестно-склеенными слоями. Анизотропные свойства древесины позволяют применять методы по комбинированию в конструкциях продольных слоев древесины с перекрестно-ориентированными слоями. Данные технологии создают возможность внедрения малоотходных технологий [5].

ПК Лира 10 применяется для расчета и проектирования строительных конструкций (железобетонных, металлических, деревянных и др.). Существенным недостатком ПК Лира (последней версии 10.12) является отсутствие возможности конструирования сечения деревянных элементов для расчета по I и II группе предельных состояний [6]. На момент исследования данный тип расчета возможен лишь для железобетонных и металлических конструкций. ПК Лира 10.12 позволяет определить максимальные напряжения конструкций и деформации в узлах.

В исследовании предлагается построить модели клееных деревянных балок двух типов: балки, склеенные только из продольных ламелей, и балки, склеенные попеременно из продольных и перекрестно-ориентированных слоев. После выполнения расчета необходимо произвести сравнительный анализ изменения значений напряжений и деформаций.

Для возможности оценки возможного применения клееных деревянных балок с перекрестно-ориентированными слоями в качестве конструкций жилых и общественных зданий, будет выполнен подбор возможного шага балок.

Методы

В исследовании предлагается построить модели клееных деревянных балок пролетом 3 м. При построении будет рассмотрено 2 типа балок: балки,

склеенные только из продольных ламелей, и балки, склеенные попеременно из продольных и перекрестно-ориентированных слоев. Сечение балки выбрано из 7-ми слоев, высота каждого слоя составляет 33 мм (32 мм толщина доски и 1 мм клеевой шов), ширина сечения, согласно сортамента пиломатериалов, принята 150 мм (см. рисунки 1 и 2).

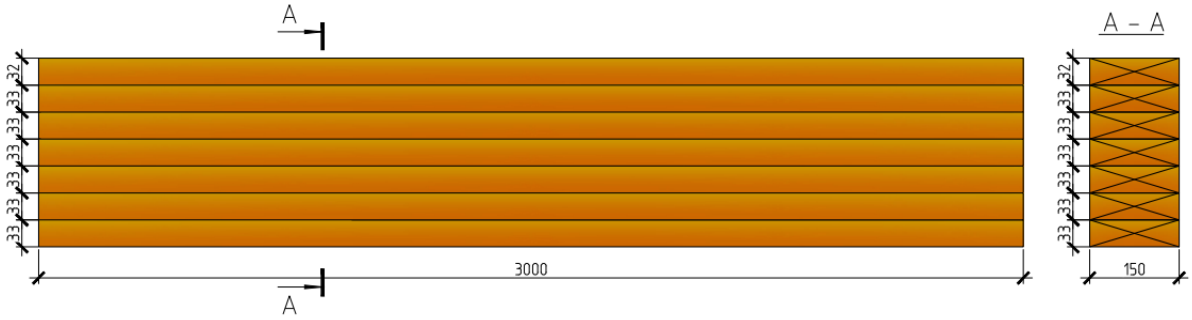


Рис. 1. Схема балки с продольно-ориентированными слоями

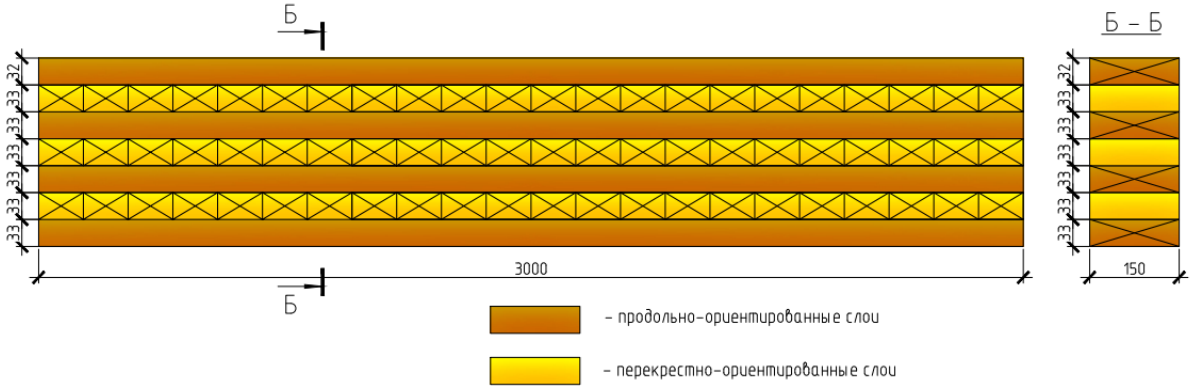


Рис. 2. Схема комбинированной балки с перекрестно-ориентированными слоями

Балки данного типа предполагается применять в конструкциях чердачных и междуэтажных перекрытий жилых и общественных зданий. Согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» нормативные значения равномерно распределенных кратковременных нагрузок на перекрытия принимаем:

- для чердачных помещений – 0,7 кПа;
- для жилых помещений – 1,5 кПа;
- для офисных, бытовых и административных помещений – 2,0 кПа.

Производим сбор нагрузок на деревянные перекрытия (см. табл. 1-3).

Таблица 1. Сбор нагрузок для чердачных перекрытий – полезная нагрузка 0,7 кПа

№ п/п	Наименование нагрузки	Норм. нагр-а, кг/м^2	Коэф. надежн-и	Расч. нагр-а, кг/м^2
	Постоянные			
1	Минеральная вата t=100 мм	10	1,2	12
2	Подшивка потолка доской t=20 мм	10	1,2	12
3	Подшивка потолка ГКЛ12,5 мм	10	1,2	12
	Кратковременные			
4	Полезная нагрузка - 0,7 кПа	72	1,3	93,6
			Итого:	129,6

Таблица 2. Сбор нагрузок для межэтажных перекрытий жилых помещений– полезная нагрузка 1,5 кПа

№ п/п	Наименование нагрузки	Норм. нагр-а, кг/м^2	Коэф. надежн-и	Расч. нагр-а, кг/м^2
	Постоянные			
1	Покрытие пола линолеум/ламинат	5	1,2	6
2	Дощатый настил t=40 мм	20	1,2	24
3	Минеральная вата t=100 мм	10	1,2	12
4	Второстепенные балки	15	1,2	18
5	Подшивка потолка доской t=20 мм	10	1,2	12
6	Подшивка потолка ГКЛ12,5 мм	10	1,2	12
	Кратковременные			
7	Полезная нагрузка – 1,5 кПа	152,9	1,3	198,77
			Итого:	282,77

Таблица 3. Сбор нагрузок для межэтажных перекрытий офисных помещений– полезная нагрузка 2,0 кПа

№ п/п	Наименование нагрузки	Норм. нагр-а, кг/м^2	Коэф. надежн-и	Расч. нагр-а, кг/м^2
	Постоянные			
1	Покрытие пола линолеум/ламинат	5	1,2	6
2	Дощатый настил t=40 мм	20	1,2	24

3	Минеральная вата t=100 мм	10	1,2	12
4	Второстепенные балки	15	1,2	18
5	Подшивка потолка доской t=20 мм	10	1,2	12
6	Подшивка потолка ГКЛ12,5 мм	10	1,2	12
	Кратковременные			
7	Полезная нагрузка – 2,0 кПа	203,9	1,2	244,68
			Итого:	334,68

Расчетная схема балки представлена на рис. 3. Суммарные нагрузки (в том числе собственный вес балок) прикладываем к балке с учетом предполагаемого шага балок. Предполагаемые шаги балок для сравнительного анализа условно принимаем 3 м, 6 м и 9 м [7].

При построении модели клееной деревянной балки применялся метод конечных элементов (МКЭ). Основные заданные характеристики в ПК Лира 10.12 для древесины: модуль упругости вдоль волокон – 10000 МПа, модуль упругости против волокон – 400 МПа, модуль сдвига – 500 МПа, коэффициент Пуассона поперек волокон при напряжениях, направленных вдоль волокон - 0,5, коэффициент Пуассона вдоль волокон при напряжениях направленных поперек волокон - 0,02. Для перекрестно-ориентированных слоев характеристики древесины назначаются в соответствии с перекрестным направлением волокон относительно балки.

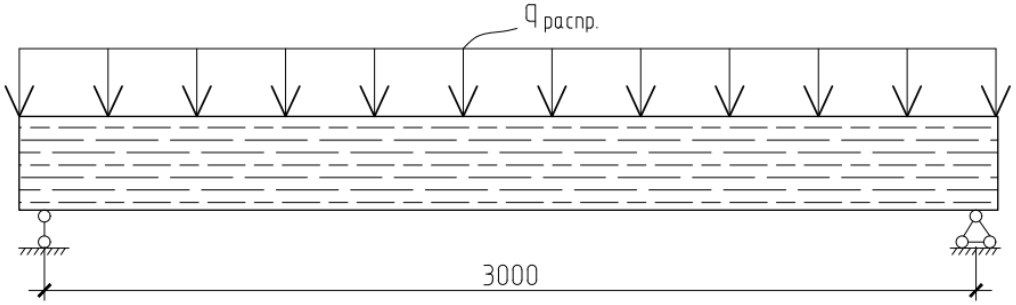


Рис. 3. Расчетная схема балки.

Результаты и обсуждение

2.1. Описание результатов 1

На первом этапе исследования был выполнен расчет в ПК Лира 10.12 для 7ми-слойной клееной деревянной балки, выполненной только из продольных слоев древесины. Расчет произведен для трех типов деревянных перекрытий: чердачное перекрытие, междуэтажное перекрытие жилых зданий и междуэтажное перекрытие офисных зданий. Результаты расчета представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты расчета балки из продольно-склеенных слоев

Тип перекрытия	Расч. нагрузка, кг/м^2	Шаг балок, м	Максим. деформации, мм	Максим. напр-е по расчету, МПа
Чердачное 0,7 кПа	129,6	3	3,107	2,84
		6	6,78	6,196
		9	8,025	7,334
Междуэт. жилые 1,5 кПа	282,77	3	6,215	5,68
		6	13,56	12,39
		9	16,05	14,67
Междуэт. офисы 2,0 кПа	334,68	3	9,322	8,519
		6	**20,34**	18,59
		9	**24,07**	22,00



Рис. 4. Диаграмма напряжений балки в ПК Лира 10.2.

2.2. Описание результатов 2

На втором этапе исследования был выполнен расчет в ПК Лира 10.12 для 7ми-слойной клееной деревянной балки, выполненной с применением перекрестно-ориентированных слоев. Аналогично, как и для первого этапа, расчет произведен для трех типов перекрытий с аналогичными загружениями. Результаты расчета представлены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты расчета балки из продольно-склеенных слоев

Тип перекрытия	Расч. нагрузка, кг/м^2	Шаг балок, м	Максим. деформации, мм	Максим. напр-е по расчету, Мпа
Чердачное 0,7 кПа	129,6	3	4,069	3,882
		6	8,877	8,47
		9	10,51	10,02

Междуэт. жилые 1,5 кПа	282,77	3	8,137	7,764
		6	17,75	16,94
		9	**21,01**	20,05
Междуэт. офисы 2,0 кПа	334,68	3	12,21	11,65
		6	**26,63**	25,41
		9	**31,52**	30,07

Выводы

По результатам проведенного исследования и опираясь на расчет в ПК Лира, можно сделать следующие выводы:

1. Согласно расчету в ПК Лира, напряжения 7х-слойных балок пролетом 3 м с перекрестно-ориентированными слоями выше на 36,6% чем балок без перекрестно-ориентированных слоев.
2. Деформации узлов балок с перекрестно-ориентированными слоями на 31,1% выше, чем у балок без перекрестно-ориентированных слоев.
3. Предельные деформации (прогибы) согласно СП 20.13330.2016 для балок пролетом 3 м составляют 1/150 пролета, т.е. 20 мм. Таким образом, для балок перекрестно-ориентированными слоями и полезной нагрузкой перекрытий жилых помещений 1,5 кПа недопустимым из предложенных является пролет 9 м, а для балок с перекрестно-ориентированными слоями и полезной нагрузкой 2,0 кПа недопустимыми являются пролеты 6 и 9 м.
4. Если сравнивать предельные деформации для обеих типов балок по всем трем типам перекрытий, то единственным отличительным фактором является загружение перекрытия междуэтажных жилых зданий при шаге балок 9 м для балок с перекрестно-ориентированными слоями. В остальных загружениях конечные результаты по применению балок практически идентичны.
5. Из негативных факторов расчета в ПК Лира можно выделить: отсутствие конструирования сечения деревянной конструкции (для версии 10.12) [8] и соответственно расчета по I и II группе предельных состояний автоматически и отсутствие возможности учесть работу клеевого соединения [9] для более точного определения НДС балок.

Таким образом, клееные деревянные балки пролетом 3 м с применением перекрестно-ориентированных слоев могут найти применение для чердачных деревянных перекрытий при условном шаге балок 3, 6 и 9 м, для деревянных междуэтажных перекрытий жилых помещений с шагом балок 3 и 6 м, для деревянных междуэтажных перекрытий офисных помещений с шагом балок 3 м.

Список использованной литературы

1. Полищук Н.Ю., Аубакирова Б.Б., Шапорева А.В. Расчет и анализ работы консольно-балочного деревянного прогона в ПК ЛИРА-

САПР// Вестник Северо-Казахстанского Университета им. М. Козыбаева. 2024; №3 (63). С. 142-149. DOI: 10.54596/2958-0048-2024-3-142-149.

2. Ноздрачева, В. А. Способ расчета жилого здания из древесины перекрестно клееной в программном комплексе Dlubal RFEM по нормативам США // Молодой ученый. 2023. № 16 (463). С. 55-58.

3. Кузнецова Т. А. Расчет балок с помощью программного комплекса "ABAQUS" // Научные проблемы водного транспорта. 2016. №47.

4. Погорельцев, А. А. Дальнейшее развитие и совершенствование норм проектирования конструкций из древесины // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 3. С. 35-41. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.35-41.

5. W. Dong, C. M. Rose, J. A. Stegemann Cross-laminated secondary timber: Validation of non-destructive assessment of structural properties by full-scale bending tests// Engineering Structures 298. 2024. 117029, 2024 – 15 c. DOI:10.1016/j.engstruct.2023.117029.

6. Барабаш М.С. Современные технологии расчёта и проектирования металлических и деревянных конструкций: учебное пособие / М.С. Барабаш, М.В. Лазнюк, М.Л. Мартынова, Н.И. Пресняков. Москва: АСВ, 2008. 327 с. ISBN: 978-5-93093-564-6.

7. Евсеев А.В., Черкасов А.В., Веселова П.А. Поиск оптимального шага несущих деревянных балок межэтажного перекрытия из СИП-панелей // Наука и бизнес: пути развития. 2020. № 4 (106). С. 61-63.

8. Минигалеева С. А. Численное моделирование деревянной балки в программном комплексе ANSYS / С. А. Минигалеева // Современная наука: проблемы, идеи, тенденции: материалы Международной (заочной) научно-практической конференции, Прага, Чехия, 18 февраля 2021 года. – Нефтекамск: Научно-издательский центр "Мир науки" (ИП Вострецов Александр Ильич), 2021. – С. 95-101. – EDN TQGHVV.

9. Устарханов О. М., Булгаков А. И., Муселемов Х. М., Устарханов Т. О. Расчёт трехслойных балок с учетом клеевого шва по методу конечных элементов с помощью ПК Лира // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2012. №5. С. 69-72.

УДК 69.04

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ СДВИГА НА КОНСТРУКЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ

Чибрикин Данила Александрович, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций ИАСЭ, **Катрецкая Виктория Андреевна***, студент 2 курса ИАСЭ

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация),
victoriakatretskaya@gmail.com

Аннотация. Учет деформаций сдвига является критически важным для обеспечения безопасности, надежности и долговечности строительных конструкций и материалов. В строительной механике сдвиговые воздействия учитываются для повышения устойчивости зданий и сооружений, в то время как в архитектурном проектировании сдвиг объемов применяется для создания сложных пространственных решений. Возникая под действием поперечных сил, сдвиговые деформации существенно влияют на распределение напряжений в элементах конструкций, в связи с чем их точный расчет представляется необходимым условием обеспечения прочности и устойчивости. В статье рассматриваются ключевые расчетные подходы и аналитические зависимости. Согласно приведенным оценкам, пренебрежение сдвиговыми деформациями может привести к недооценке прогибов на 10–25% и повышению риска аварийных ситуаций на 30–40%. Минимизация этих рисков достигается за счет применения современных методов компьютерного моделирования (таких как трехмерный анализ) и систем мониторинга. Игнорирование учета сдвига при проектировании может повлечь за собой серьезные последствия, включая снижение эксплуатационной надежности и ускоренный износ конструкций.
Ключевые слова: деформация сдвига, строительные сдвиги, фундаменты, касательные напряжения, условие прочности.

INFLUENCE OF SHEAR DEFORMATION ON STRUCTURES IN THE DESIGN OF MULTI-STOREY BUILDINGS

Chibrikin Danila Altksandrovich, C. Sc., docent at the Department of Building Structures IASE, **Katretskaya Victoria Andreyevna***, 2nd year student of IASE

[1]Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation),
victoriakatretskaya@gmail.com

Abstract. Accounting for shear deformations is critically important for ensuring the safety, reliability, and durability of structural systems and materials. In structural mechanics, shear effects are considered to enhance the stability of buildings and structures, while in architectural design, volumetric shifting is employed to create complex spatial configurations. Induced by transverse forces, shear deformations significantly affect the stress distribution within structural members, necessitating their precise calculation as a fundamental prerequisite for ensuring strength and stability. This article examines key computational methodologies and analytical relationships. According to the presented estimates, neglecting shear deformations can lead to an underprediction of deflections by 10–25% and an increase in the risk of structural failures by 30–40. The mitigation of these risks is achieved through the application of advanced computational modeling techniques, such as three-dimensional analysis, and integrated monitoring systems. Disregarding shear in design can result in severe consequences, including diminished serviceability reliability and accelerated degradation of structures.
Keywords: shear deformation, building shifts, foundations, tangential stresses, strength condition.

Введение

Сдвиговая деформация представляет собой разновидность продольной деформации бруса, возникающая при воздействии касательной силы на его поверхность, при условии неподвижного закрепления нижней части [1]. Этот тип деформации характеризуется относительным смещением одной плоскости твёрдого тела относительно другой в пространстве.

Сдвиговые деформации имеют фундаментальное значение для обеспечения безопасности, надёжности и долговечности строительных конструкций и материалов в различных отраслях промышленности. Их учёт необходим для проектирования устойчивых сооружений, способных противостоять внешним нагрузкам, а также для оптимизации архитектурных решений и анализа механических свойств материалов.

Целью настоящей работы является систематизация и анализ роли сдвиговых деформаций при проектировании и эксплуатации строительных конструкций. Рассматриваются инженерные применения сдвига, от обеспечения пространственной жесткости до архитектурного проектирования; анализируются особенности поведения различных конструкций под сдвиговой нагрузкой, а также излагаются основные расчетные методы и условия прочности.

Учет сдвиговых деформаций в строительстве

Сдвиговые деформации находят широкое применение в строительной практике для решения разнообразных задач. Элементы, воспринимающие сдвиговые нагрузки, такие как диафрагмы жесткости, обеспечивают эффективную передачу поперечных сил от внешних стен, перекрытий и кровли к фундаменту, что повышает устойчивость зданий к боковым

нагрузкам, включая ветровые и сейсмические воздействия. Примерами таких элементов служат железобетонные стены или вертикальные фермы [2].

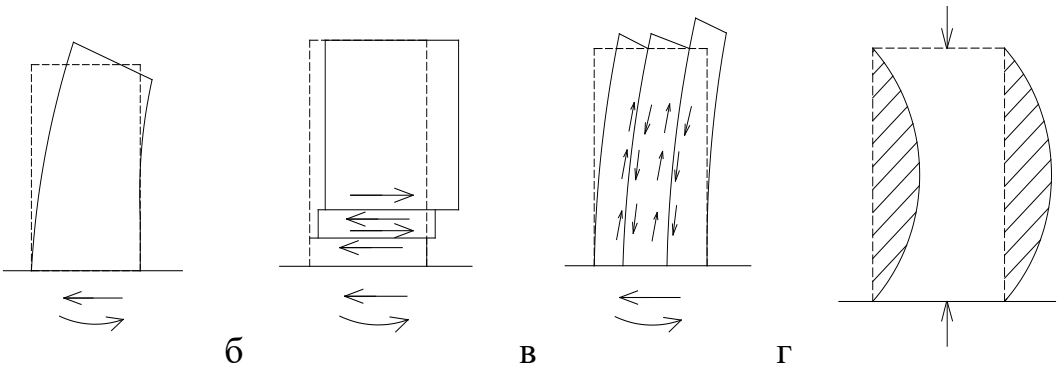


Рис. 1. Диафрагма жесткости более жесткая по своей главной оси. Механизмы разрушения диафрагм жесткости (а) при изгибе, (б) горизонтальный сдвиг, (в) вертикальный сдвиг, (г) потеря устойчивости.

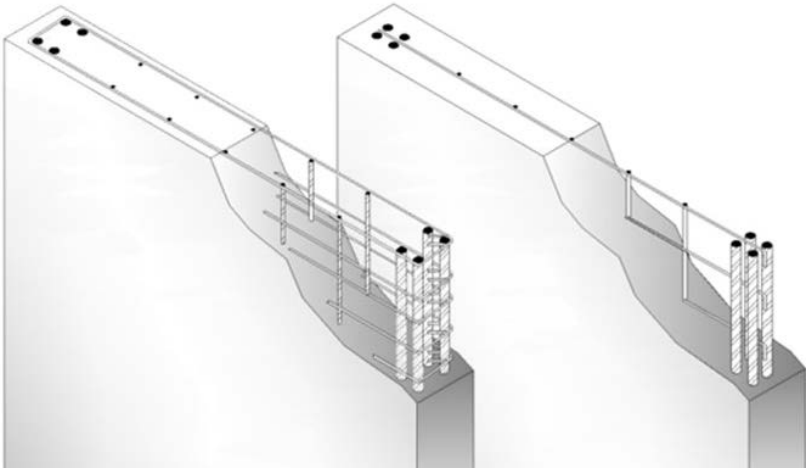


Рис. 2. Стена жесткости из железобетона с горизонтальным и вертикальным армированием

В архитектуре сдвиг объёма используется для создания сложных планировочных решений. Например, применение сдвига позволяет формировать углублённые лоджии, выступающие элементы общих помещений или вынесенные за пределы здания узлы вертикальных коммуникаций [3].

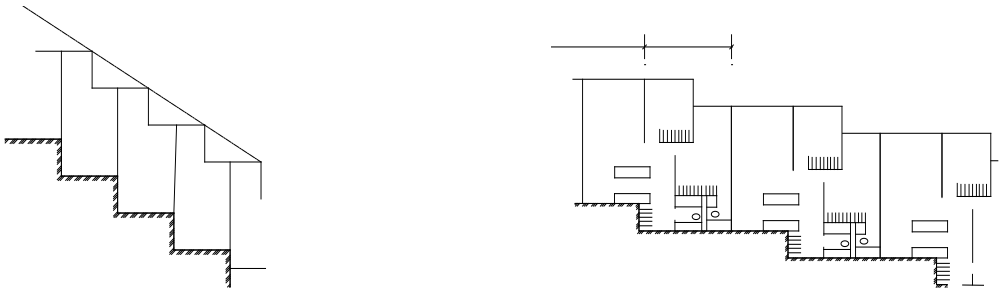


Рис. 3. Усложнения объема здания могут быть вызваны условиями участка строительства, например, привязкой к диагональной линии границы участка. Ограниченность длины участка может быть компенсирована за счет сдвига.

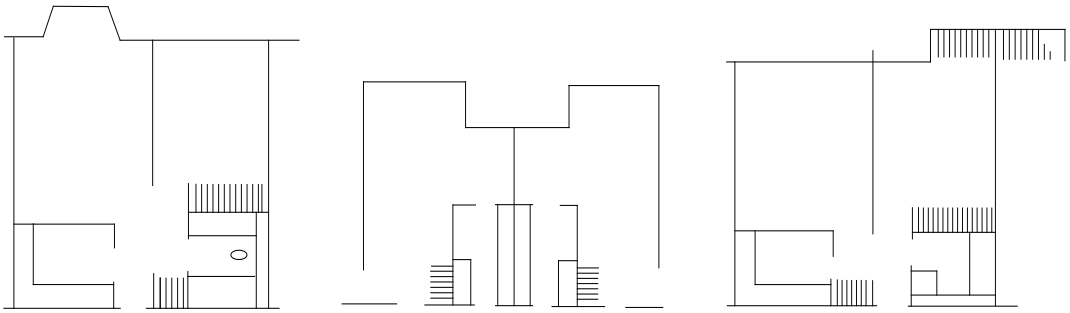


Рис. 4. Эркеры не только увеличивают пространство общих комнат (что желательно при сравнительно малой ширине корпуса), но также могут изменять ориентацию окон, улучшая вид из окна или инсоляцию комнат северного фасада.

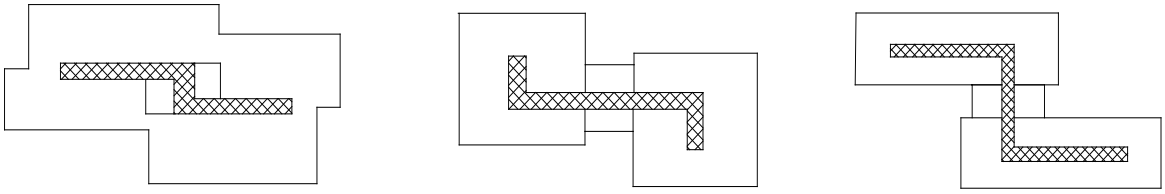


Рисунок 5. Излом в объеме здания используется для того, чтобы прервать слишком длинный коридор; следует также упомянуть прием объединения двух корпусов одним узлом вертикальных коммуникаций.

Сдвиговые соединения применяются для передачи поперечных сил между конструктивными элементами, что особенно важно для балок и других деталей, подверженных внутренним поперечным нагрузкам [4, 5].

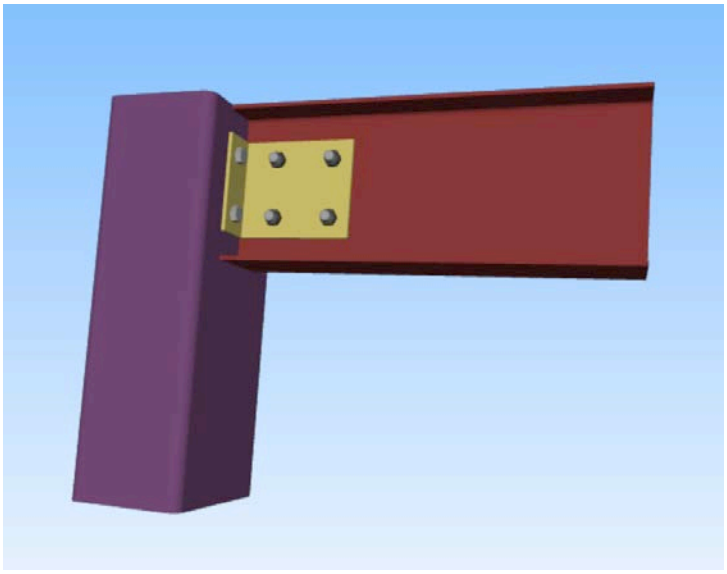


Рис. 6. Одноугловое соединение – пример сдвигового соединения

Сдвиговая деформация используется для оценки механических характеристик материалов, таких как модуль сдвига, отражающий жёсткость материала при сдвиговых нагрузках [6]. В строительстве сдвиги применяются для корректировки разбивки точек с учётом отклонений от проектной трассы, что критично для сохранения проезжей части в процессе строительства. Анализ сдвиговых деформаций необходим для оценки прочности и устойчивости таких элементов, как балки, колонны и фундаменты, что позволяет прогнозировать их поведение под различными нагрузками. Сдвиговые деформации помогают анализировать поведение строительных элементов под нагрузками, обеспечивая структурную целостность зданий и сооружений. В геотехнике и геологии сдвиговые деформации играют ключевую роль при изучении поведения грунтов и горных пород под нагрузками, что важно для проектирования фундаментов и подземных сооружений. В железобетонных конструкциях поперечная арматура устанавливается для восприятия сдвиговых напряжений, повышая прочность и устойчивость.

Особенности сдвиговых деформаций в различных конструкциях

В стальных двутавровых балках сдвиговые деформации особенно значимы из-за низкой жёсткости стенок, что требует тщательного учёта при проектировании. При сейсмических или ветровых воздействиях сдвиговые деформации могут существенно влиять на устойчивость зданий, что делает их учёт критически важным. Неравномерные осадки фундаментов могут вызывать сдвиговые деформации в конструкциях, что требует применения продвинутых методов проектирования и мониторинга [7].

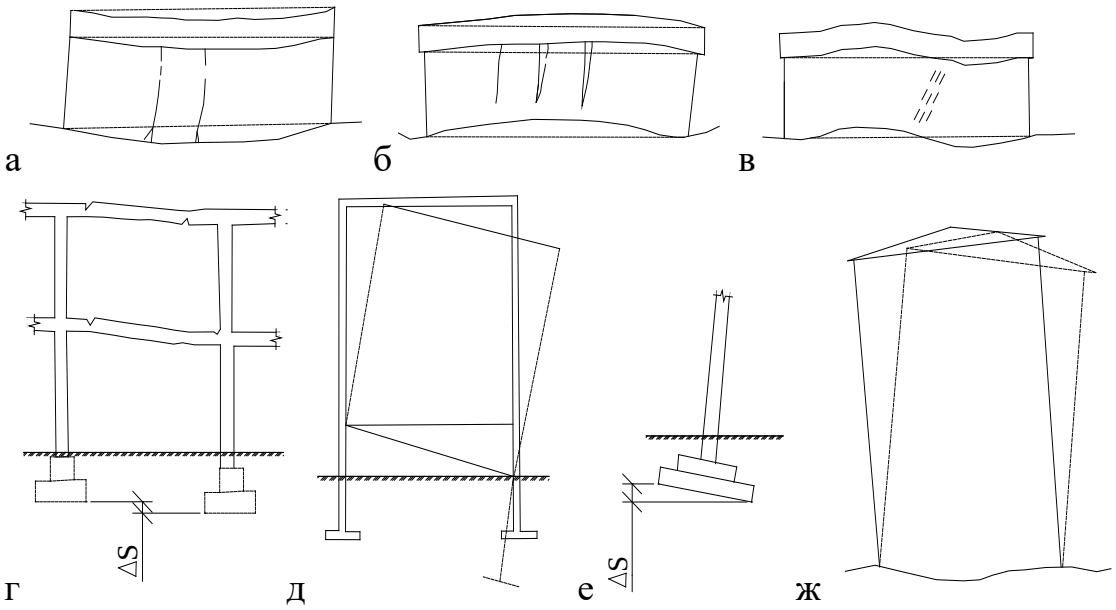


Рис. 7. Формы деформации зданий и сооружений при неравномерных осадках фундаментов: а – прогиб, б – выгиб (перегиб), в – перекос стен, г – перекос каркаса, д – крен сооружения, е – крен фундамента, ж – скручивание здания

Сдвиговые деформации, возникающие под действием поперечных сил, существенно влияют на распределение напряжений в конструкциях. Их учёт необходим для обеспечения прочности и устойчивости. Рассмотрим основные подходы и расчётные формулы. Среднее касательное напряжение при равномерном распределении определяется как:

$$\tau = \frac{\mathrm{A}}{Q} \qquad (1)$$

где

Q — поперечная сила,

A — площадь сечения.

Касательные напряжения и деформации связаны законом Гука для сдвига, который применим в пределах упругого нагружения:

$$\tau = G * \gamma \qquad (2)$$

где

G — модуль сдвига материала (для стали G ≈ 80ГПа),

γ — деформация сдвига (угол искажения).

Модуль сдвига G, характеризующий жёсткость материала при сопротивлении упругим деформациям, определяется экспериментально и выражается формулой.

$$G = \frac{E}{2 * (1 + \mu)} \quad (3)$$

где

μ – коэффициент Пуассона;

E – модуль продольной упругости.

Условие прочности

Для обеспечения прочности конструкции максимальное касательное напряжение не должно превышать допускаемого значения:

$$\tau_{\max} = \frac{Q_{\max}}{A} \leq [\tau] \quad (4)$$

где

[τ] - допускаемое напряжение, определяемое с учётом коэффициента запаса прочности. Эта формула используется для проектных и проверочных расчётов, а также для определения допустимой нагрузки.

Допускаемые напряжения при сдвиге связаны с допускаемыми напряжениями при растяжении следующим соотношением:

$$[\tau] = (0{,}5 \div 0{,}6) \cdot [\sigma] \quad (5)$$

Для пластичных материалов допускаемое напряжение на срез определяется с учётом предела текучести

$$[\tau] = (0{,}25 \div 0{,}35) \cdot \sigma_{т} \quad (6)$$

Сдвиговая деформация, достигающая предела разрушения материала, называется срезом (для металлических элементов) или скалыванием (для неметаллических конструкций). При расчёте соединений, выполненных с использованием одинаковых элементов (например, болтов или заклёпок), предполагается равномерное распределение нагрузки.

Расчёты на срез сопровождаются проверкой на смятие — пластическую деформацию в зонах контакта сжатых элементов. Напряжения смятия определяются аналогично напряжениям сжатия:

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A_{сж}} \leq [\sigma]_{см} \quad (7)$$

где

N_{max} – максимальная сила сжатия,

$A_{сж}$ – площадь смятия,

$[\sigma]_{см}$ – допускаемое напряжение смятия.

Смятие приводит к образованию зазоров, что нарушает неподвижность соединения и является недопустимым. Напряжения смятия имеют локальный характер, быстро затухая с удалением от контактной поверхности, поэтому нормативные документы допускают более высокие значения допускаемых напряжений при смятии по сравнению с осевым сжатием.

В отличие от классической теории изгиба балок Бернулли, которая предполагает, что сечение балки остаётся перпендикулярным её оси при деформации, теория Тимошенко учитывает скольжение, вызванное сдвиговыми деформациями [8]. В результате сечение балки теряет перпендикулярность к оси (рис. 8). При сохранении плоского сечения распределение напряжений сдвига по высоте балки становится равномерным. Однако, учитывая параболический характер распределения, в расчётах вводится поправочный коэффициент сдвига. Для прямоугольного сечения он равен 5/6. а жёсткость при сдвиге определяется как:

$$\mathrm{G}A^{*} = \mathrm{k} * \mathrm{G} * \mathrm{A} = \frac{5}{6} * G * A \tag{8}$$

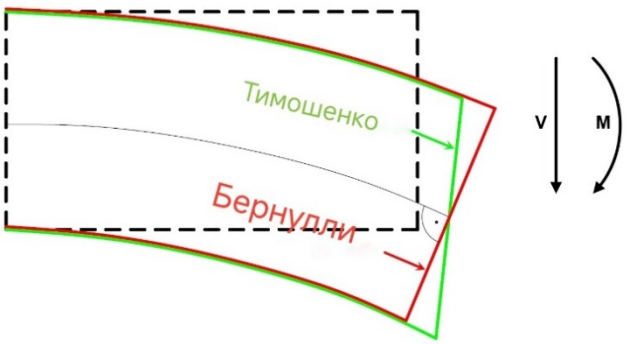


Рис. 8. Сопоставление деформаций балки Бернулли и балки Тимошенко.

По нормативным требованиям СП 64.13330.2017 рекомендует учитывать сдвиг при L/h<5.

Для повышения точности проектирования и минимизации рисков аварийных ситуаций современные методы анализа включают использование программного обеспечения для трёхмерного моделирования, такого как ANSYS, SAP2000 или SCIA Engineer. Эти инструменты позволяют учитывать сложные комбинации нагрузок, включая сдвиговые деформации, и проводить точные расчёты напряжений и деформаций в конструкциях. Кроме того, регулярный мониторинг состояния конструкций с помощью датчиков деформации и систем контроля осадок фундаментов становится неотъемлемой частью эксплуатации зданий в сейсмически активных регионах или на слабых грунтах.

Важным аспектом является также обучение специалистов, которые должны быть осведомлены о необходимости учёта сдвиговых деформаций при проектировании. Недостаточная квалификация проектировщиков или

игнорирование нормативных требований может привести к серьёзным последствиям, включая разрушение конструкций. Например, в сейсмически активных зонах, таких как регионы Дальнего Востока России, учёт сдвиговых деформаций в сочетании с применением современных антисейсмических технологий позволяет значительно повысить устойчивость зданий.

Выводы

Учёт сдвиговых деформаций обязателен для: коротких и массивных элементов (L/h < 4), конструкций с тонкостенными сечениями, объектов в сейсмически активных зонах, объектов на слабых грунтах.

Практический пример учёта сдвиговых деформаций — расчёт устойчивости подпорных стенок по схеме плоского сдвига [9]. Игнорирование сдвиговых деформаций может привести к недооценке прогибов на 10–25% и увеличению риска аварий на 30–40%. Применение современных методов, таких как 3D-моделирование, и внедрение систем мониторинга позволяет минимизировать эти риски, обеспечивая долговечность и надёжность строительных конструкций. Пренебрежение учётом сдвиговых деформаций влечёт серьёзные последствия, включая снижение эксплуатационной надёжности и ускоренный износ конструкций.

Список используемой литературы

1. Hdz-Gil, L., Gil-Martín, L.M. & Hernández-Montes, E. A Simple Method for Calculating the Shear Deformation of Reinforced Concrete Elements in the Elastic and Plastic Domains. Int J Civ Eng 21, 2037–2047 (2023). https://doi.org/10.1007/s40999-023-00864-y.

2. Khajooei M.S. Investigate the effect of concrete shear wall arrangement on the roof diaphragms stiffness and floor shear transfer in steel buildings. Journal of Civil Engineering and Structures. 2024;8(1):15-21. DOI: 10.21859/jces.8145.

3. Neufert, Ernst. Architects' Data. 4th ed. Wiley-Blackwell, 2012.

4. Qureshi J., Lam D., Ye J. Effect of shear connector spacing and layout on the shear connector capacity in composite beams. Journal of Constructional Steel Research. 2011. Vol. 67, Iss. 4. P. 706-719.

5. Тонких Г.П., Чесноков Д.А. Экспериментальное исследование сдвигового соединения монолитных сталежелезобетонных перекрытий на уголковых анкерных упорах // Вестник МГСУ. 2021. №2. С. 144-152.

6. Жигун В.И., Плуме Э.З., Муйжниекс К.И., Краснов Л.Л. Универсальные методы определения модулей сдвига композиционных материалов // Механика композитных материалов и конструкций. 2020. Т. 26, № 3. С. 313–326.

7. Zhang Y., Duan L., Li Y., Gao M. Study on deformation characteristics of underground pipeline corridors and uneven settlement factors of foundations in sandy chalky soil layer. Frontiers in Earth Science. 2024. Vol. 11. Article No. 1266559.

8. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. Т. 1. ОГИЗ; Гостехиздат, 1945. С. 151.
9. Орлова В.В., Пронкина Т.Н., Аветян Л.В. Основания и фундаменты: практикум / Инженерная школа ДВФУ. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2018. – 32 с. – ISBN 978-5-7444-4410-5

УДК 69.07

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АРМИРОВАННЫХ ДЕРЕВЯННЫХ БАЛОК МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Чибрикин Данила Александрович*, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций ИАСЭ, **Рева Анна Алексеевна**, магистрант кафедры строительных конструкций

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), dachibrikin@outlook.com

Аннотация. Статья представляет собой всесторонний анализ влияния различных методов деформации на структурные и механические свойства материалов, уделяя особое внимание поведению различных марок стали при заданных условиях нагружения. В исследовании используются передовые методы компьютерного моделирования и экспериментальные техники для оценки распределения деформации и концентрации напряжений в материальной матрице. Ключевые результаты включают оптимизацию параметров деформации для повышения долговечности материалов и выявление критических порогов для сохранения структурной целостности. Исследование вносит вклад в разработку более устойчивых методов обработки материалов, что имеет потенциальное применение в промышленной инженерии.

Ключевые слова: деформация, свойства материалов, концентрация напряжений, распределение деформации, марки стали, структурная целостность, компьютерное моделирование, экспериментальный анализ, повышение долговечности

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF REINFORCED WOODEN BEAMS BY THE FINITE ELEMENT METHOD

Chibrikin Danila Alexandrovich*, Ph.D., Associate Professor of the Department of Building Structures, **Reva Anna Alekseevna**, Master's student of the Department of Building Structures

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), dachibrikin@outlook.com

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of the impact of various deformation methods on the structural and mechanical properties of materials, focusing on the behavior of different steel grades under specific loading conditions. The study employs advanced computational modeling and experimental techniques to evaluate the strain distribution and stress concentration in the material matrix. Key findings include the optimization of deformation parameters to enhance material durability and the identification of critical thresholds for maintaining structural integrity. The research contributes to the development of more resilient material processing techniques, with potential applications in industrial engineering.
Keywords: deformation, material properties, stress concentration, strain distribution, steel grades, structural integrity, computational modeling, experimental analysis, durability enhancement

Введение

Древесина, как традиционный строительный материал, обладает рядом неоспоримых преимуществ, таких как экологичность, возобновляемость, низкая теплопроводность и высокая удельная прочность. Однако ее широкому применению в ответственных конструкциях препятствуют и существенные недостатки: анизотропия механических свойств, подверженность влажностным деформациям, наличие природных пороков, а также сравнительно низкая прочность на растяжение поперек волокон и скалывание. Эти особенности приводят к тому, что деревянные конструкции, особенно балки перекрытий, часто работают с неполным использованием несущей способности материала, ограничиваясь допустимыми деформациями или напряжениями в зоне растяжения.

Одним из эффективных путей повышения несущей способности и жесткости деревянных балок является их армирование высокопрочными материалами. Традиционно для этого использовалась стальная арматура, однако в последние десятилетия все большее распространение получают композитные материалы на основе углеродных (карбон), арамидных, базальтовых и стеклянных волокон. Эти материалы обладают высокой прочностью на растяжение, коррозионной стойкостью и малым весом, что делает их перспективными для усиления и ремонта строительных конструкций. Размещение таких материалов в растянутой зоне балки

позволяет перераспределить внутренние усилия, взяв на себя основную долю растягивающих напряжений, и тем самым значительно повысить жесткость и прочность элемента.

Проектирование и оценка эффективности таких комбинированных элементов требуют точного прогнозирования их напряженно-деформированного состояния (НДС). Аналитический расчет армированных деревянных балок сопряжен со значительными трудностями, обусловленными необходимостью учета совместной работы разнородных материалов, их нелинейного деформирования и ортотропных свойств древесины. В этой связи адекватным и мощным инструментом исследования является метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий с высокой детализацией моделировать работу сложных систем.

Система автоматизированного проектирования (САПР) позволяет создавать сочетания прикладываемых нагрузок, сечения различного вида и подбор их по результатам расчета, которые учитываются в создаваемой модели. Реализованы расчеты железобетонных, каменных и армокаменных, металлических и деревянных конструкций и генерировать рабочие чертежи по результатам расчета исследуемой модели [1], [2].

ПК ЛИРА обладает линейным и нелинейными процессами расчета [3]. Данные процессы определяют напряженные-деформированные состояния созданных конечно-элементных моделей и позволяют решать задачи с высокой скоростью в отличие от инженерных расчетов [4]. Линейный процессор применяется для решения задач с учетом линейной упругости материалов. Нелинейный процессор применяется для решения задач с учетом физической нелинейности материалов. Имеет широкое применение для расчета различных конструкций за счет примененной нелинейной теории [4]. Для решений задач в ПК ЛИРА имеется база элементов, которая дает создавать различные расчетные модели [3]. Система РСУ позволяет произвести выбор наиболее опасных сочетаний усилий по критерию экстремальных напряжений и в соответствии с нормативными документами многих стран [1]. Система РСН позволяет определить перемещения, усилия и напряжения от стандартных и произвольных линейных комбинаций загружений.

Целью настоящего исследования является сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния деревянных балок, армированных различными типами композитных материалов (углеродное, арамидное, базальтовое и стекловолоконное полотна), с использованием метода конечных элементов в программном комплексе «ЛИРА-САПР».

Методы

Приведена расчетная модель деревянных балочных конструкций, армированных стальными тросами в зоне растяжения. Вычислительная модель задана как физическая модель древесины – транстропное объемное тело, полученное триангуляцией объемной модели деревянной балки [4], [6].

Выполнены расчеты балок длиной 6 м, поперечным сечением 100х200 (h) мм.

Маркировка балок:

Б-1 – деревянная балка;

Баулрз-1 – деревянная балка, армированная углеродной лентой в растянутой зоне;

Баалрз-1 – деревянная балка, армированная арамидной лентой в растянутой зоне;

Баблрз-1 – деревянная балка, армированная базальтовой лентой в растянутой зоне;

Басврз-1 – деревянная балка, армированная стекловолокном в растянутой зоне;

Для всех серий балок были заданы одинаковые условия: концевые закрепления – шарнирно, действующая нагрузка - в середине пролета [5].

Порядок выполнения численного расчета в ПК ЛИРА:

Создание задачи с шестью степенями свободны в узле;

Создание геометрии объекта;

Выполнение траингуляции геометрии объекта;

Создание узлов связи опирания балки. Для одного края задается шарнирно неподвижная опора (X, Y, Z), другая опора шарнирно подвижная (Y, Z).

Создание характеристик материала

Для древесины:

Задание типа жесткости для объемного КЭ – 36 (универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический КЭ). Задание плотности (Ro=500 кг⁄м^3) и механических констант с учетом ортотропии:

Модули Юнга – $E1 = 10000$ МПа; $E2 = 400$ Мпа; $E3 = 10000$ МПа.

Коэффициенты Пуассона – $V = V13 = V31 = V32 = 0{,}45$;

$$V21 = V23 = 0{,}02$$

Модули сдвига – $G12 = G13 = G23 = 600$ МПа.

Для углеродной ленты:

Задание типа жесткости для объемного КЭ – 36 (универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический КЭ). Задание плотности ($Ro = 2000$ кг/м^3) и механических констант с учетом изотропии:

Модули Юнга – $E = 4200$ МПа.

Коэффициенты Пуассона – $V = 0{,}2$;

Для арамидной ленты:

Задание типа жесткости для объемного КЭ – 36 (универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический КЭ). Задание плотности ($Ro = 1500$ кг/м^3) и механических констант с учетом изотропии:

Модули Юнга – $E = 3250$ МПа.

Коэффициенты Пуассона – $V = 0{,}2$;

Для базальтовой ленты:

Задание типа жесткости для объемного КЭ – 36 (универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический КЭ). Задание плотности ($Ro = 2500$ кг/м^3) и механических констант с учетом изотропии:

Модули Юнга – $E = 3400$ МПа.

Коэффициенты Пуассона – $V = 0{,}2$ [4], [5]

Создание сосредоточенных нагрузок в четвертях пролета. Создание собственного вес для полученной геометрии. Выполнение расчета. Представление в виде деформированной схемы, изополей напряжений.

Результаты и обсуждение

По результатам численного расчета построены изополя нормальных и касательных напряжений зависимости, деформации.

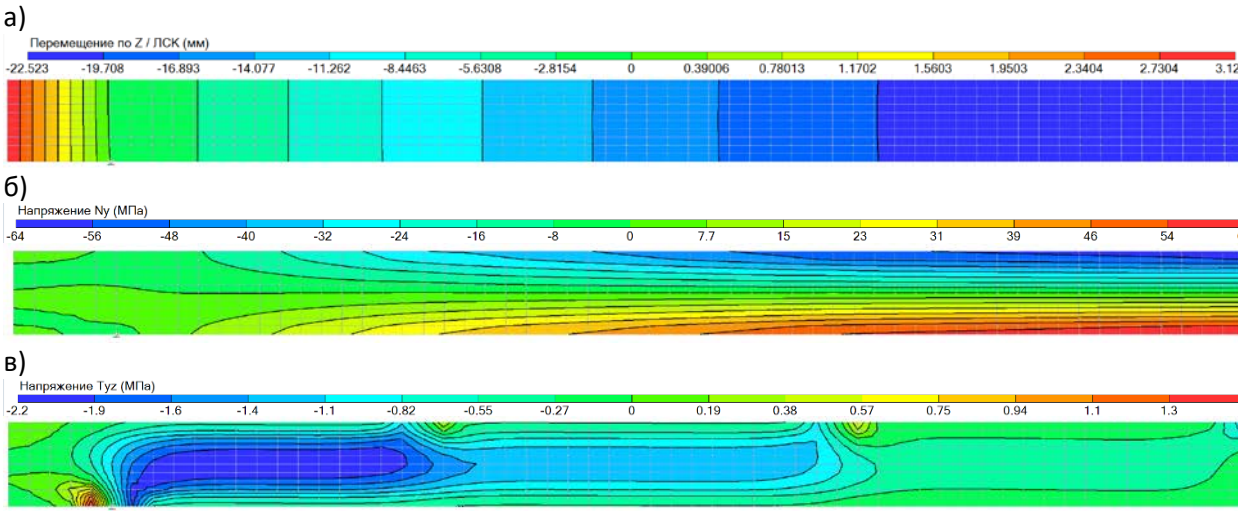


Рис. 1. Расчет половины балки серии Б-0 а) деформация, мм; б) нормальные напряжения, Па в) касательные напряжения, Па.

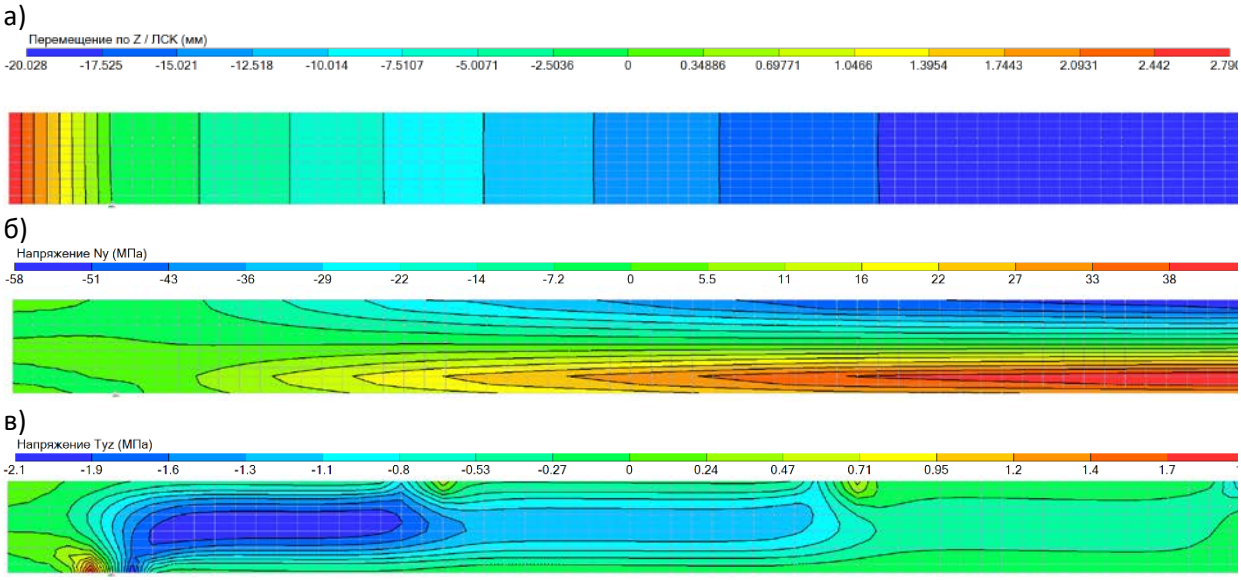


Рис. 2. Расчет половины балки серии Баулрз-1 а) деформация, мм; б) нормальные напряжения, Па в) касательные напряжения, Па.

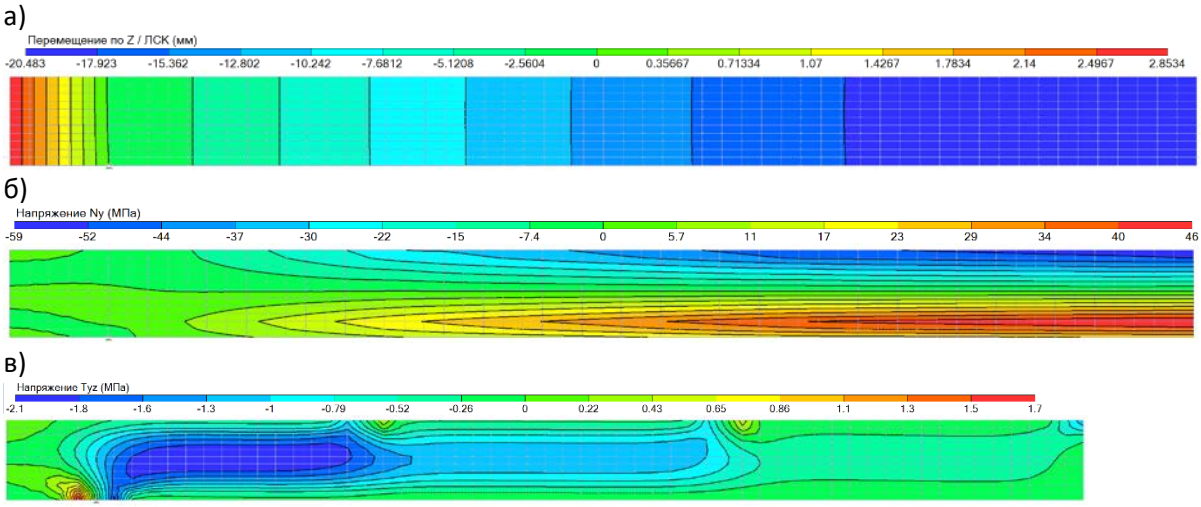


Рис. 3. Расчет половины балки серии Баалрз-1 а) деформация, мм; б) нормальные напряжения, Па в) касательные напряжения, Па.

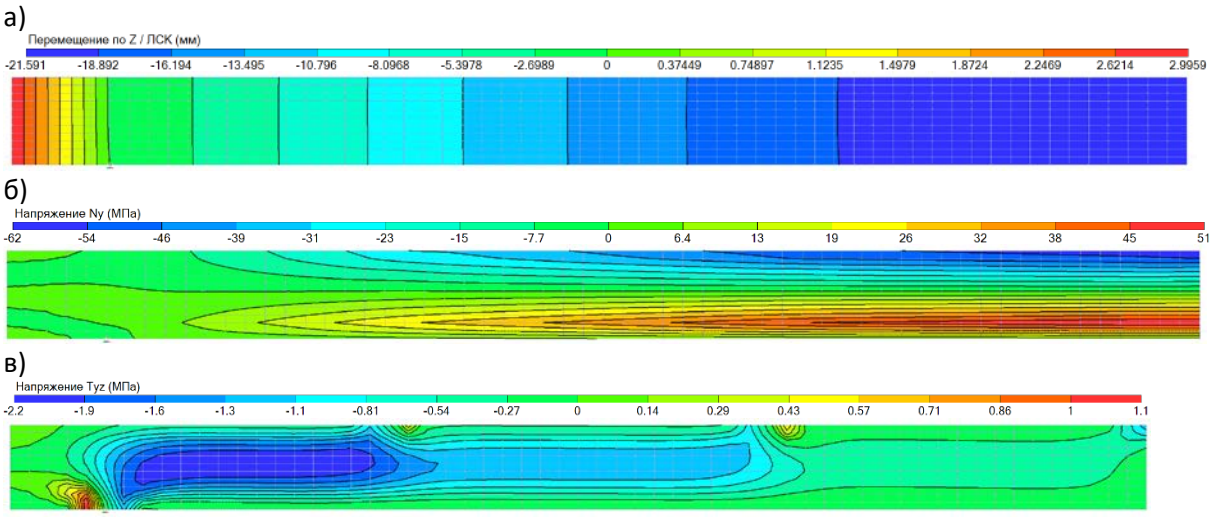


Рис. 4. Расчет половины балки серии Баблрз-1 а) деформация, мм; б) нормальные напряжения, Па в) касательные напряжения, Па.

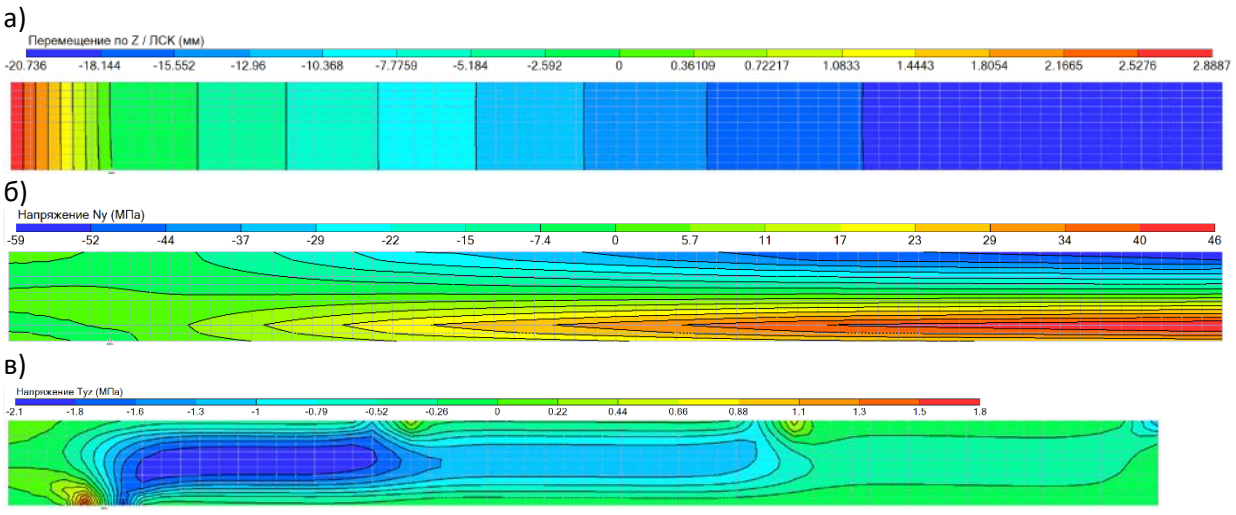


Рис. 5. Расчет половины балки серии Басврз-1 а) деформация, мм; б) нормальные напряжения, Па в) касательные напряжения, Па.

По изополям нормальных и касательных напряжений, результатам деформаций получены диаграммы «Нагрузка-Растягивающие напряжения», «Нагрузка-Сжимающие напряжения», «Нагрузка-Касательные напряжения», «Нагрузка-Перемещения» [4], [7].

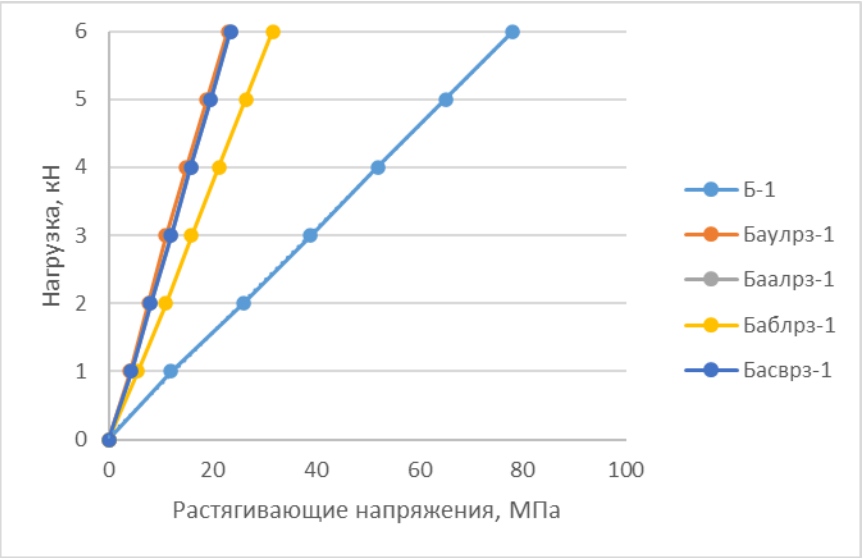


Рис. 6. Диаграмма «Нагрузка-Растягивающие напряжения»

Согласно рисунку 6, в диапазоне растягивающих напряжений до 30 МПа для большинства исследуемых образцов наблюдается линейная зависимость между нагрузкой и напряжением, что свидетельствует об упругом характере работы материалов в данном интервале. Максимальные значения нагрузки при одинаковом уровне напряжений отмечаются у серии Б-1, минимальные — у балок серии Баблрз-1. Балки серий Баулрз-1, Баалрз-1 и Басврз-1 демонстрируют схожий уровень нагрузок, различия между ними незначительны.

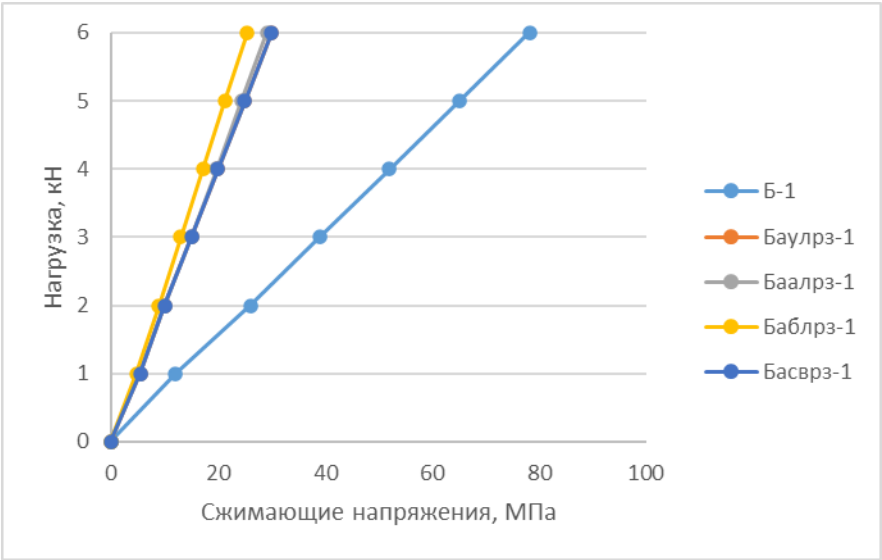


Рис. 7. Диаграмма «Нагрузка-Сжимающие напряжения»

Согласно рисунку 7, в диапазоне сжимающих напряжений до 30 МПа для большинства образцов наблюдается линейная зависимость между нагрузкой и напряжением, что указывает на упругое поведение материалов в данном интервале.

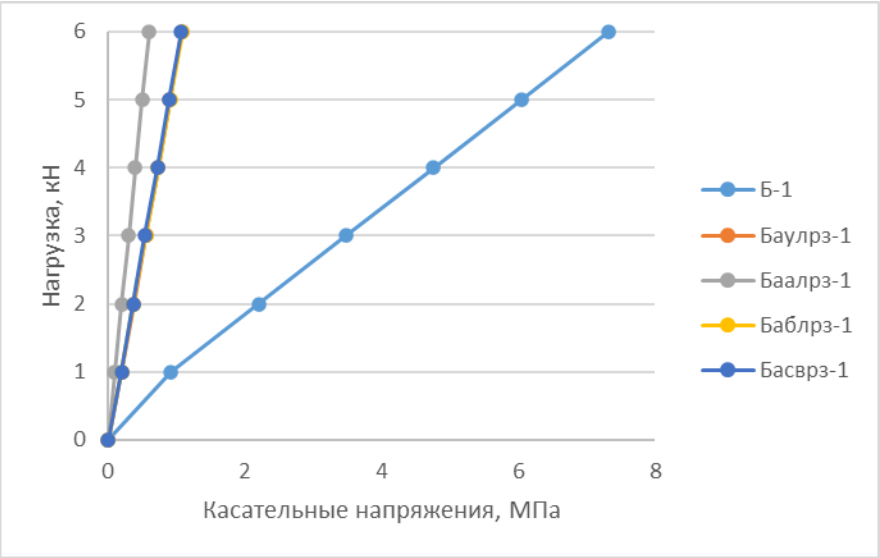


Рис. 8. Диаграмма «Нагрузка-Касательные напряжения»

На основе анализа рисунка 8 «нагрузка — касательные напряжения» можно сделать общий вывод, что все исследованные материалы и условия испытаний демонстрируют линейную зависимость между нагрузкой и касательными напряжениями в пределах заданного диапазона (до 6–8 МПа), что свидетельствует об упругом характере деформаций.

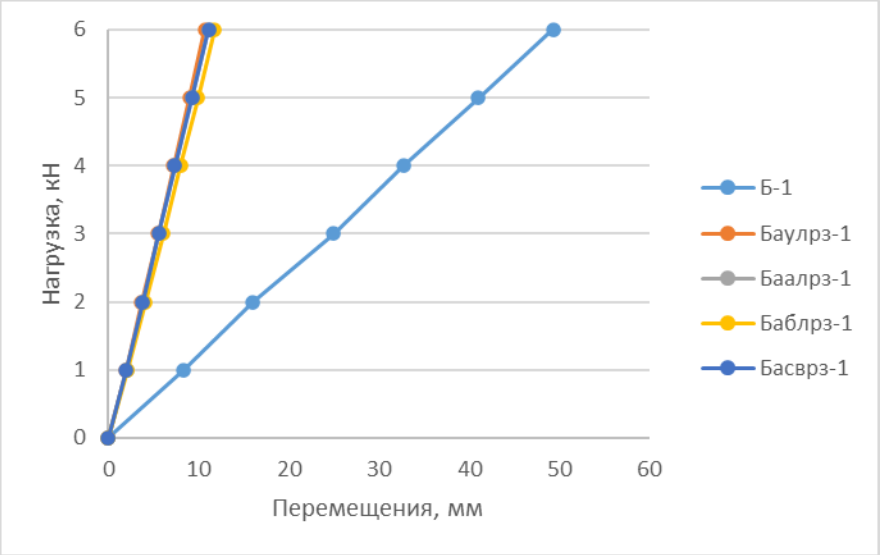


Рис. 9. Диаграмма «Нагрузка-Деформации»

Согласно рисунку 9, все исследованные серии балок демонстрируют упругое поведение, характеризующееся линейной зависимостью между нагрузкой и перемещением в пределах до 60 мм. Различия в наклонах

линейных участков кривых указывают на вариации в жесткостных характеристиках материалов; при этом наибольшую показатель демонстрирует серия балок Б-1.

Сравнительный анализ результатов численного исследования представлено в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчетов коэффициента диффузии и ширины

Серия	Нормальные напряжения в растянутой зоне, МПа	К-т исп.	Нормальные напряжения в сжатой зоне, МПа	К-т исп.	Касательные напряжения, МПа	К-т исп.	Прогибы, мм	К-т исп.
Бм-1	78.2	1	78.2	1	7.32	1	49.33	1,00
Баулрз-1	23	0.29	30	0.38	1.08	0.15	10.73	0.22
Баблрз-1	23.53	0.30	29.17	0.37	1.07	0.15	11.13	0.23
Баблрз-1	31.67	0.40	25.47	0.33	1.09	0.15	11.8	0.24
Басврз-1	23.53	0.30	30	0.38	1.07	0.15	11.13	0.23

Результаты численного моделирования эксперимента представлены в таблице 1. Анализ результатов показал, что неармированные балки (Бм-1) показали наихудшие прочностные и жесткостные показатели: нормальные напряжения в сжатой и растянутой зоне – 78,2 МПа, касательные напряжения – 7,32 МПа, прогиб 49,33 мм. Для балок серий Баулрз, Баблрз, Баблрз, Басврз в зависимости от коэффициента наблюдается значительный прирост прочности и снижение деформативности относительно эталонной балки: по напряжениям в растянутой зоне +60,0…71,0 %; по напряжениям в сжатой зоне +62,00…67,00 %; по касательным напряжениям +85,00 %; по деформациям +76,00…78,00 % [7], [8], [9].

Список использованной литературы

1. СП 64.13330.2018. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. — М.: Минстрой России, 2018.

2. СП 20.13330.2018. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. — М.: Минстрой России, 2018.

3. СП 17.13330.2016. Кровли. Актуализированная редакция СНиП II-26-76. — М.: Минстрой России, 2016.

4. Ашкенази Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов. — М.: Лесная промышленность, 2020. — 224 с.
5. Ермолаев В. В., Цепаев В. А. О расчете деформаций соединений деревянных конструкций // Жилищное строительство. — 2018. — № 6. — С. 21–23.
6. Калугин А. В. Деревянные конструкции: учебное пособие. — М.: Изд-во АСВ, 2022. — 224 с.
7. Иванов В. Ф. Деревянные конструкции. — СПб.: Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 2022. — 317 с.
8. Гаппоев М. М., Базенков Т. Н. Исследование работы нагельных соединений с металлическими прокладками // В сб.: Исследование прочности и эффективности современных конструкций из древесины и пластмасс. — МИСИ, 2022. — С. 23–30.
9. Вешняков А. В. Повышение эксплуатационной надежности и снижение материалоемкости деревянных пространственных конструкций: дис. ... канд. техн. наук. — Архангельск, 2021. — 187 с.

УДК 69.07

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ЭКСПЛУАТАЦИИ И УСИЛЕНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ СТРОПИЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Чибрикин Данила Александрович*, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций, **Стрекалкин Антон Андреевич**, магистрант кафедры строительных конструкций

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), dachibrikin@outlook.com

Аннотация. Древесина остается востребованным строительным материалом благодаря своей экологичности, прочности, лёгкости и теплоизоляционным свойствам. В статье рассмотрены преимущества и недостатки древесины, области её применения в строительстве, а также основные виды деревянных конструкций кровли. Отдельное внимание уделено устройству стропильных систем, классификации дефектов, причинам их возникновения и современным способам усиления конструкций. Подробно описаны материалы, используемые для восстановления и повышения прочностных характеристик деревянных элементов. Анализ основан на существующих технологиях и практике эксплуатации, что позволяет сформировать комплексный подход к

повышению надёжности и долговечности деревянных конструкций в современных строительных условиях.
Ключевые слова: древесина; стропила; кровля; усиление; дефекты.

PECULIARITIES OF DESIGN, OPERATION AND REINFORCEMENT OF WOODEN RAFTER STRUCTURES

Chibrikin Danila Alexandrovich, Ph.D., Associate Professor of the Department of Building Structures, **Strekalkin Anton Andreyevich**, Master's student of the Department of Building Structures

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), dachibrikin@outlook.com

Abstract. Wood remains a sought-after building material due to its environmental friendliness, durability, lightness and thermal insulation properties. The article considers the advantages and disadvantages of wood, its application in construction, as well as the main types of wooden roof structures. Special attention is paid to the construction of rafter systems, classification of defects, causes of their occurrence and modern methods of strengthening structures. Materials used to restore and increase the strength characteristics of wooden elements are described in detail. The analysis is based on existing technologies and operating practices, which allows to form a comprehensive approach to improving the reliability and durability of wooden structures in modern construction conditions.
Keywords: Wood; rafters; roofing; reinforcement; defects.

Введение

Древесина — один из древнейших и универсальных строительных материалов, применяемых в проектировании и возведении зданий [1]. Ее природные свойства, такие как малый вес, высокая удельная прочность, теплоизоляционность, а также эстетическая привлекательность, способствуют широкому применению в современном строительстве [2-3]. Однако древесина подвержена внешним воздействиям, что требует внимательного подхода к проектированию и эксплуатации деревянных конструкций, в том числе стропильных систем кровли [4].

Особую актуальность приобретает задача обеспечения долговечности и несущей способности деревянных стропильных систем в течение всего жизненного цикла здания. В процессе эксплуатации на конструкции кровли воздействует комплекс факторов, включая переменные температурно-влажностные условия, механические нагрузки (снеговые, ветровые), а также биологические угрозы. Подобные воздействия приводят к накоплению дефектов и повреждений, снижающих расчетные характеристики элементов и требующих своевременного выявления и устранения.

В связи с этим, разработка и совершенствование эффективных методов диагностики, ремонта и усиления деревянных стропильных конструкций являются важной научно-практической задачей.

Методы

В ходе исследования выполнен структурный анализ характеристик древесины, включая её достоинства и недостатки. Проведена классификация типов деревянных кровельных конструкций: ферм, балок, стропил, решёток, плит, арок. Рассмотрены конструктивные элементы стропильной системы и особенности их взаимодействия. Выделены основные типы дефектов, систематизированные по происхождению, и определены причины их возникновения. Описаны методы усиления, включая механические, химические и композитные технологии, а также современные материалы для повышения эксплуатационных характеристик конструкций.

Результаты и обсуждение

Древесина отличается прочностью при относительно низком удельном весе, что облегчает монтаж и снижает нагрузки на фундамент. Её теплоизоляционные свойства позволяют минимизировать теплопотери. Простота механической обработки делает древесину удобной в строительстве, а природная текстура обеспечивает высокие эстетические качества [5]. Ключевые ограничения включают горючесть, биологическую уязвимость (гниение, паразиты), а также подверженность деформациям при изменении влажности. Эти свойства требуют защитной обработки и систематического ухода [6]. К основным видам относятся треугольные, полигональные и арочные фермы, балки, наслонные и висячие стропила, а также решётки, арки и ребристые плиты. Каждая конструкция применяется в зависимости от архитектурных и функциональных особенностей здания [7]. Конструкция стропильной системы включает элементы: стропила, мауэрлат, коньковый прогон, контррейку, обрешётку, подкосы, распорки, стояки и соединительные элементы (рисунок 1).



Рис. 1. Элементы стропильной системы (по материалам открытых источников)

Стропильная система передаёт нагрузку от кровли на несущие стены и фундамент, формируя основу крыши и обеспечивая ее устойчивость к внешним воздействиям. Классификация дефектов подразделяются на производственно-технические, эксплуатационные, органические, физико-механические и технические [8]. Основные причины — неблагоприятные климатические условия, ошибки монтажа, применение некачественного материала, отсутствие защитной обработки. Распространённые дефекты включают деформацию, трещины, поражение грибками, разрушение креплений [9-10]. Несвоевременное устранение нарушений может привести к потере несущей способности. Среди эффективных методов усиления – установка металлических и деревянных накладок, добавление опор, замена повреждённых участков, инъекционная пропитка, применение углеволокна, стеклопластика, базальтопластика и других современных композитов (рисунок 2).

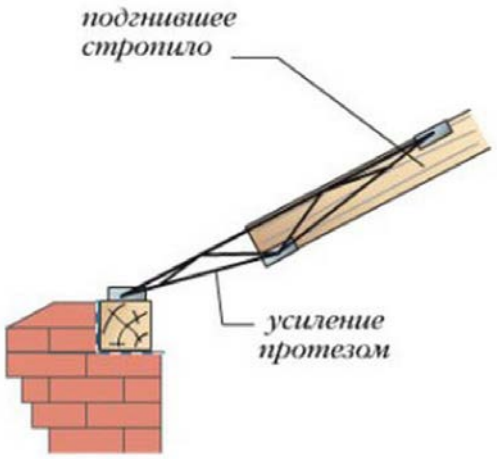


Рис. 2. Пропитанная антисептическими составами стропильная система кровли (по материалам открытых источников)

Пропитка антисептиками и антипиренами позволяет предотвратить дальнейшее разрушение (рисунок 3).



Рис. 3. Пропитанная антисептическими составами стропильная система кровли (по материалам открытых источников)

Для восстановления конструкций применяются: металлические накладки и уголки, композитные ткани (углеволокно, стеклопластик), эпоксидные смолы, биоциды, водоотталкивающие покрытия. Подбор материалов зависит от вида дефекта, условий эксплуатации и экономических факторов.

Таким образом, проведенный анализ демонстрирует, что обеспечение долговечности и несущей способности деревянных стропильных конструкций требует комплексного подхода, интегрирующего корректное проектирование с учетом реальных эксплуатационных нагрузок и агрессивности среды, систематический мониторинг для выявления дефектов на ранних стадиях, а также применение соответствующих методов усиления. Весьма перспективными являются технологии, использующие композитные материалы на основе угле- и стеклопластика, которые позволяют существенно повысить прочностные характеристики элементов при минимальном увеличении массы и сохранении исторического облика конструкций, что в совокупности с химическими методами защиты формирует научно-обоснованную базу для ремонта и модернизации существующих стропильных систем.

Выводы

Древесина сохраняет высокую актуальность в строительстве благодаря своим уникальным свойствам и разнообразным возможностям применения. Тем не менее, при проектировании деревянных конструкций необходимо учитывать её уязвимость к внешним воздействиям. Эффективная эксплуатация и своевременное техническое обслуживание — ключевые условия долговечности. Комплексный подход к диагностике, ремонту и

усилению позволяет продлить срок службы деревянных конструкций и обеспечить безопасность зданий. Применение современных материалов и технологий усиливает несущую способность стропильных систем и адаптирует их к условиям современного строительства.

Список использованной литературы

1. Barham, L., Duller, G.A.T., Candy, I. et al. Evidence for the earliest structural use of wood at least 476,000 years ago. Nature 622, 107–111 (2023).
2. Wang Q., Wang Z., Feng X., Zhao Y., Li Z. Mechanical properties and probabilistic models of wood and engineered wood products: A review of green construction materials. Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 21. Article No. e03796.
3. Шамаев А.В., Попова Н.И., Берзиньш Г.В. Химические изменения древесины при модифицировании ее мочевиной // Химия древесины. 1976. № 4. С. 34-38.
4. Шамаев В.А., Медведев И.Н. К вопросу модифицирования древесины для производства столбов ЛЭП // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2. № 2-1(7-1). С. 192-197.
5. М. С. Лисятников, М. В. Лукин, Д. А. Чибрикин, С. И. Рощина Прочность древесины, модифицированной полимерной композицией с наноструктурным наполнителем // Строительство и реконструкция. 2022. № 4(102). С. 41-51. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-102-4-41-51
6. Борисов, А. Ю. Древесина осины как материал для устройства кровли // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2014. № 8-1(145). С. 87-90.
7. Рогожина, А. В. Развитие и анализ основных технологий малоэтажного строительства из материалов на основе древесины / А. В. Рогожина // Жилищное строительство. 2019. № 12. С. 35-39. DOI 10.31659/0044-4472-2019-12-35-39.
8. В. И. Запруднов, Н. Г. Серегин, Н. И. Потехин Перспективы строительства уникальных зданий и сооружений из древесины // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2023. Т. 27, № 4. С. 128-136. DOI 10.18698/2542-1468-2023-4-128-136.
9. В. Д. Кузьмин, В. С. Соколова Перспективные технологии в изготовлении деревянных конструкций // Актуальные проблемы архитектуры : Материалы 71-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 04–06 апреля 2018 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. С. 182-187.
10. К. С. Петров, К. Г. Крищенко, К. Г. Погосов, А. С. Жукова Применение современных строительных материалов и технологий при устройстве кровель // Инженерный вестник Дона. 019. № 6(57). С. 7.

УДК 69.07

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЕЙ В СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Чибрикин Данила Александрович*, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций, **Фетисов Михаил Михайлович**, магистрант кафедры строительных конструкций

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), dachibrikin@outlook.com

Аннотация. Современное строительство предъявляет повышенные требования к эффективности и надёжности металлических конструкций, что требует изучения напряжённо-деформированного состояния (НДС) различных марок стали. Рассмотрены направления исследований НДС с применением численных методов моделирования, в том числе метода конечных элементов (МКЭ), и современных методик технической диагностики. Проанализированы преимущества высокопрочных сталей, особенности применения холодногнутых тонкостенных профилей, а также перспективы использования атмосферостойких сталей. Особое внимание уделено вопросам проектирования узлов металлических конструкций и применению автоматизированных систем. Проведён анализ нормативных аспектов и рассмотрены примеры реального применения полученных данных в различных отраслях, включая промышленное и высотное строительство. Полученные выводы демонстрируют, что комплексный подход к изучению НДС способствует повышению надёжности и экономичности строительных объектов.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние; сталь; строительные конструкции; численное моделирование; метод конечных элементов.

INTEGRATED APPROACH TO THE STUDY OF STRESS-STRAIN STATE OF STEELS IN BUILDING STRUCTURES

Chibrikin Danila Alexandrovich*, Ph.D., Associate Professor of the Department of Building Structures, **Fetisov Mikhail Mikhailovich**, Master's student of the Department of Building Structures

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), dachibrikin@outlook.com

Abstract. Modern construction imposes increased requirements to the efficiency and reliability of metal structures, which requires an in-depth study of the stress-strain state (STS) of various steel grades. The paper considers the directions of VAT research using numerical modeling methods, including the finite element method (FEM), and modern techniques of technical diagnostics. Advantages of high-strength steels, peculiarities of application of cold-formed thin-walled sections, as well as prospects of using weather-resistant steels are analyzed. Special attention is paid to the issues of design of metal structure assemblies and application of automated systems. Regulatory aspects are analyzed and examples of real application of the obtained data in various industries, including industrial and high-rise construction, are considered. The obtained conclusions demonstrate that an integrated approach to the study of VAT contributes to the improvement of reliability and cost-effectiveness of construction projects.
Keywords: stress-strain state; steel; building structures; numerical modeling; finite element method.

Введение

В условиях промышленного строительства и увеличения нагрузок на несущие элементы зданий встает вопрос о надежной оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) стальных конструкций [1]. Современные технологии проектирования требуют точных данных о прочностных и деформационных характеристиках материалов, в особенности сталей, которые используются в наиболее нагруженных зонах сооружений [2-3]. В этой связи особую значимость приобретает комплексное изучение НДС с учетом структуры, технологии производства и особенностей эксплуатации металлоконструкций [4].

Вместе с тем, несмотря на обширный арсенал существующих методов оценки НДС, их применение зачастую носит разрозненный характер. Это приводит к тому, что проектные решения основываются на данных, не в полной мере учитывающих синергию между микроструктурой материала, макроскопическим откликом конструкции и влиянием длительных эксплуатационных факторов. Таким образом, актуальной научно-практической проблемой является разработка и апробация целостной методологии, интегрирующей материаловедческий анализ, современные средства диагностики и численное моделирование для прогнозирования поведения стальных конструкций на всех этапах жизненного цикла.

Методы

Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) сталей в строительных конструкциях основывается на сочетании экспериментальных, численных и аналитических подходов. В структурно-механическом анализе учитываются тип стали, легирующие элементы, тепловая обработка и структура. Показано, что высокопрочные стали, такие как S960QL, обладают высокой пластичностью, а микролегированные стали

типа 700MC обеспечивают значительный ресурс прочности за счёт дисперсного твердения [5]. Цифровая корреляция изображений и сканирование используется для визуализации полей деформаций, оценки неоднородности распределения напряжений и анализа зон концентрации. Эти методы обеспечивают получение точных карт перемещений и напряжений [6]. Методы неразрушающего контроля включают компьютерную томографию, акустическую эмиссию, радиографию, инфракрасную термографию и визуальный контроль. Компьютерная томография позволяет выявлять внутренние дефекты металла, в том числе пористость и расслоения, не нарушая целостности образцов. Математическое и численное моделирование. Применение метода конечных элементов (МКЭ), в том числе в средах ANSYS и Abaqus, позволяет получить пространственные модели НДС конструкций с учетом анизотропии, пластичности и повреждаемости материала.

Пример исследования НДС представлен на рисунке 1.

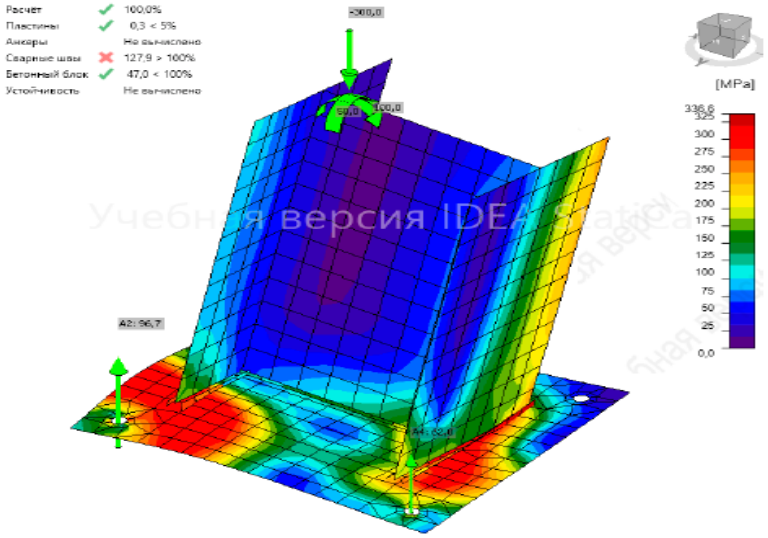


Рис. 1. НДС базы колонны без дополнительных подкрепляющих элементов

Диагностика на уровне конструкции. Проводятся испытания натурных элементов, расчет устойчивости и прочности узлов, анализ микроповреждений с помощью акустической эмиссии, а также оценка эксплуатационных повреждений. Другим методом является сравнительный анализ марок стали. Анализируются поведение и НДС различных сталей (С235, С355, С690, С960 и др.) при различных условиях нагрузки. Учитываются параметры пластичности, жесткости, сопротивления усталости и хрупкому разрушению [7-8].

Ключевым аспектом методологии является не просто последовательное применение перечисленных методов, а их итеративное взаимодействие в рамках единого исследовательского цикла. Результаты механических испытаний и структурного анализа служат основой для калибровки физически нелинейных моделей материала в МКЭ. Данные, полученные методом цифровой корреляции изображений (DIC) при натурных испытаниях или на

физических моделях, используются для верификации адекватности конечно-элементных моделей. В свою очередь, верифицированная численная модель позволяет экстраполировать ограниченные экспериментальные данные на более широкий спектр нагрузок и конструктивных схем, а также идентифицировать зоны концентрации напряжений, требующие пристального внимания при неразрушающем контроле. Такой замкнутый цикл «эксперимент → верификация модели → численный анализ → целевая диагностика» обеспечивает необходимую полноту и достоверность оценки НДС.

Результаты и обсуждение

Рассмотрение примеров из практики (например, разрушение кровли торгового центра вследствие отсутствия оценки остаточной прочности) позволяет обозначить важность предварительного анализа НДС при реконструкции и модернизации объектов. Использование неразрушающего контроля, цифрового моделирования и современных материалов существенно повышает уровень безопасности. Верифицированная в ANSYS или Abaqus модель, параметры материала для которой калиброваны по результатам структурно-механического анализа (для сталей S960QL, 700MC и др.), приобретает прогностическую способность. Это позволяет экстраполировать ограниченные экспериментальные данные на более широкий класс задач, в частности, анализировать поведение конструкции при нагрузках, зачастую трудновоспроизводимых в лабораторных условиях, исследовать отклик в зонах, недоступных для прямых измерений, и моделировать долговременные процессы, такие как усталостное повреждение и ползучесть.

Комплексная оценка НДС позволяет оптимизировать выбор марок сталей с учётом условий эксплуатации (агрессивные среды, динамические нагрузки, сейсмическая активность и т.п.) и добиться рационального расхода материалов при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов [10]. При этом даже в относительно простых узлах МКЭ позволяет выявить зоны значительной концентрации напряжений, которые не всегда очевидны при использовании аналитических методов, основанных на гипотезе равномерного распределения. Полученные пространственные поля напряжений и деформаций предоставляют количественную основу для оптимизации геометрии узла, например, за счет введения дополнительных подкрепляющих элементов или изменения конфигурации сварных швов. Это напрямую соотносится с проблемой проектирования надежных узлов, обозначенной во введении, и позволяет перейти от эмпирических рекомендаций к научно обоснованным конструктивным решениям, минимизирующим риск хрупкого или усталостного разрушения.

Анализ прецедентов, подобных разрушению кровли торгового центра, обусловливает высокую практическую значимость комплексной методологии для задач реконструкции и модернизации. Комбинация неразрушающих методов (компьютерная томография для выявления внутренних дефектов, ИК-

термография для оценки целостности соединений) с последующим численным моделированием, учитывающим выявленные дефекты и реальную историю нагружения, позволяет количественно оценить остаточный ресурс конструкции. Такой подход является научной альтернативой субъективным визуальным оценкам и позволяет обосновать необходимость и объем усиления или, напротив, подтвердить достаточную несущую способность существующих элементов, что ведет к значительной экономии средств.

В целом, комплексный подход к оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) стальных строительных конструкций, интегрирующий материаловедческий анализ, современные экспериментальные методики и численное моделирование, позволяет перейти от фрагментарной диагностики к целостному прогнозу поведения конструкций.

Выводы

Комплексное исследование напряженно-деформированного состояния сталей в строительных конструкциях требует учета множества факторов: от микроструктуры материала и технологии его производства до условий эксплуатации и характера внешней нагрузки. Представленные в работе методы — структурно-механический анализ, цифровая визуализация деформаций, неразрушающий контроль и численное моделирование — демонстрируют высокую эффективность при оценке НДС. Их совмещение обеспечивает всестороннюю и точную диагностику состояния конструкций, позволяет выявлять потенциальные зоны риска и формировать обоснованные инженерные решения на стадии проектирования и эксплуатации.

Список использованной литературы

1. М. В. Лукин, Д. А. Чибрикин, В. Б. Деев, С. И. Рощина. Численное исследование напряженно-деформированного состояния сталей для применения в строительных конструкциях металлургических цехов // Черные металлы. 2023. № 12. DOI: 10.17580/chm.2023.12.15

2. Е.Л. Алексеева, А.А. Альхименко, А.К. Беляев. Оценка напряженно-деформированного состояния и растрескивания атмосферостойкой конструкционной стали методом акустоупругости // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. №12(51). С. 33-44. DOI: 10.18720/CUBS.51.3

3. Михаськин В.В. Исследование напряженно-деформированного состояния некоторых конструктивных решений шарнирно-опертых баз стальных колонн // Промышленное и гражданское строительство. 2023. С. 213-215.

4. Н. Д. Корсун, Д. А. Простакишина. Исследование напряженно-деформированного состояния стальных тонкостенных конструкций с учетом неравномерного распределения прочностных свойств стали по сечению профиля // Вестник евразийской науки. 2021. №6.

5. Bleck W., Brühl F., Ma Y., Sasse C. Materials and Processes for the Third-generation Advanced High-strength Steels // Berg- und Hüttenmännische Monatshefte. 2019. № 164. С. 466–474. DOI: 10.1007/s00501-019-00904-y.

6. Рингхофер М., Виммер Г., Плауль Я. Ф. и др. Переход сталелитейной отрасли на цифровые технологии // Черные металлы. 2018. № 3. С. 12-17.

7. Волкова В. Е., Макарова А. А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния балки с гибкой стенкой // Металлические конструкции. 2011. Т. 17. № 4. С. 261-269.

8. Ауэр В. Странам с быстроразвивающейся экономикой необходимо все больше стали // Черные металлы. 2013. № 4. С. 75-78.

9. Волкова В. Е., Макарова А. А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния балки с гибкой стенкой // Металлические конструкции. 2011. Т. 17. № 4. С. 261-269.

УДК 669-1

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДОГО ТИТАНА С АЛЮМИНИЕВЫМ РАСПЛАВОМ

Шабалдин Иван Владимирович, магистрант кафедры технологий функциональных и конструкционных материалов, **Рева Дмитрий Вадимович***, ассистент кафедры строительных конструкций, **Прусов Евгений Сергеевич**, д.т.н., профессор кафедры технологий функциональных и конструкционных материалов

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), reva-dima@mail.ru

Аннотация. В работе представлено количественное описание диффузионно-контролируемого массопереноса в системе Al-Ti для установления взаимосвязи между температурно-временными параметрами процесса и характеристиками формирующихся диффузионных зон. Расчетным путем определены зависимости коэффициента диффузии от температуры (в диапазоне 833-2500 К) и ширины диффузионной зоны от времени выдержки и температуры. Установлено, что решающим фактором, влияющим на ширину диффузионной зоны, является время выдержки, в то время как повышение температуры вносит сравнительно небольшой вклад. Обсуждается реакционно-диффузионный механизм формирования интерметаллидных фаз. Полученные аналитические зависимости позволяют прогнозировать толщину переходного слоя для различных технологических режимов получения литых

алюмоматричных композиционных материалов с эндогенными армирующими фазами.

Ключевые слова: алюмоматричные композиционные материалы, система Al-Ti, интерметаллидные соединения, межфазное взаимодействие, диффузия.

MODELING THE KINETICS OF INTERACTION OF SOLID TITANIUM WITH ALUMINUM MELT

Shabaldin Ivan Vladimirovich, Master's Student, Department of Functional and Structural Materials Technologies, **Reva Dmitry Vadimovich***, Assistant Professor, Department of Building Structures, **Prusov Evgeny Sergeevich**, Doctor of Science, Professor, Department of Functional and Structural Materials Technologies

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000, Russian Federation), reva-dima@mail.ru

Abstract. This paper provides a quantitative description of diffusion-controlled mass transfer in the Al-Ti system to establish a correlation between the process time-temperature parameters and the characteristics of the resulting diffusion zones. Computational methods were used to determine the dependencies of the diffusion coefficient on temperature (within the range of 833–2500 K) and the diffusion zone width on the holding time and temperature. It was established that the holding time is the decisive factor influencing the diffusion zone width, whereas a temperature increase makes a relatively minor contribution. The reactive-diffusion mechanism of intermetallic phase formation is discussed. The derived analytical relationships enable the prediction of the transition layer thickness for various processing conditions used in the production of cast aluminum matrix composites with endogenous reinforcing phases.
Keywords: aluminum matrix composite materials, Al-Ti system, intermetallic compounds, interfacial interaction, diffusion.

Введение

Современные тенденции развития алюминиевых сплавов и композиционных материалов на их основе определяются необходимостью сочетания высокой удельной прочности, термической стабильности, износостойкости и коррозионной стойкости, демпфирующих и иных специальных характеристик, что актуально для ряда высокотехнологичных отраслей промышленности, в том числе машиностроения, транспортной и энергетической техники и др. [1-3]. В качестве перспективных армирующих компонентов для алюминиевой матрицы рассматриваются тугоплавкие переходные металлы и их соединения, в частности, титан и интерметаллиды системы Al–Ti, формирующие высокомодульные термодинамически

стабильные фазы. Целенаправленное управление структурно-морфологическими параметрами алюмоматричных композитов, в том числе контролируемое формирование межфазных зон при взаимодействии расплава алюминия с порошкообразными частицами прекурсоров, выполняет ключевую роль в обеспечении требуемого сочетания свойств композиционных отливок [4, 5].

Согласно расчетам, выполненным в комплексе Thermo-Calc с использованием базы данных TCAL4 (рис. 1), система Al–Ti характеризуется образованием ряда интерметаллических соединений и твердых растворов в широком интервале температур и концентраций. При содержании до ~37 масс.% титана формируется стабильный интерметаллид Al_3Ti с упорядоченной структурой ($D0_{22}$), выделяющийся в качестве первичной фазы при кристаллизации из расплава и существующий в равновесии с α-твердым раствором при температурах ниже 665 ºС. Отличаясь высоким модулем упругости (217 ГПа), сравнительно высокой температурой плавления (1350 °С) и малой плотностью (3,4 г/см^3), фаза Al_3Ti является одной из перспективных с позиций эффективности армирующего действия для алюминиевых сплавов [6]. Синтез литых композиционных материалов Al/Al_3Ti может быть проведен с использованием методов in-situ, позволяющих управлять морфологией и дисперсностью эндогенной армирующей фазы [7].

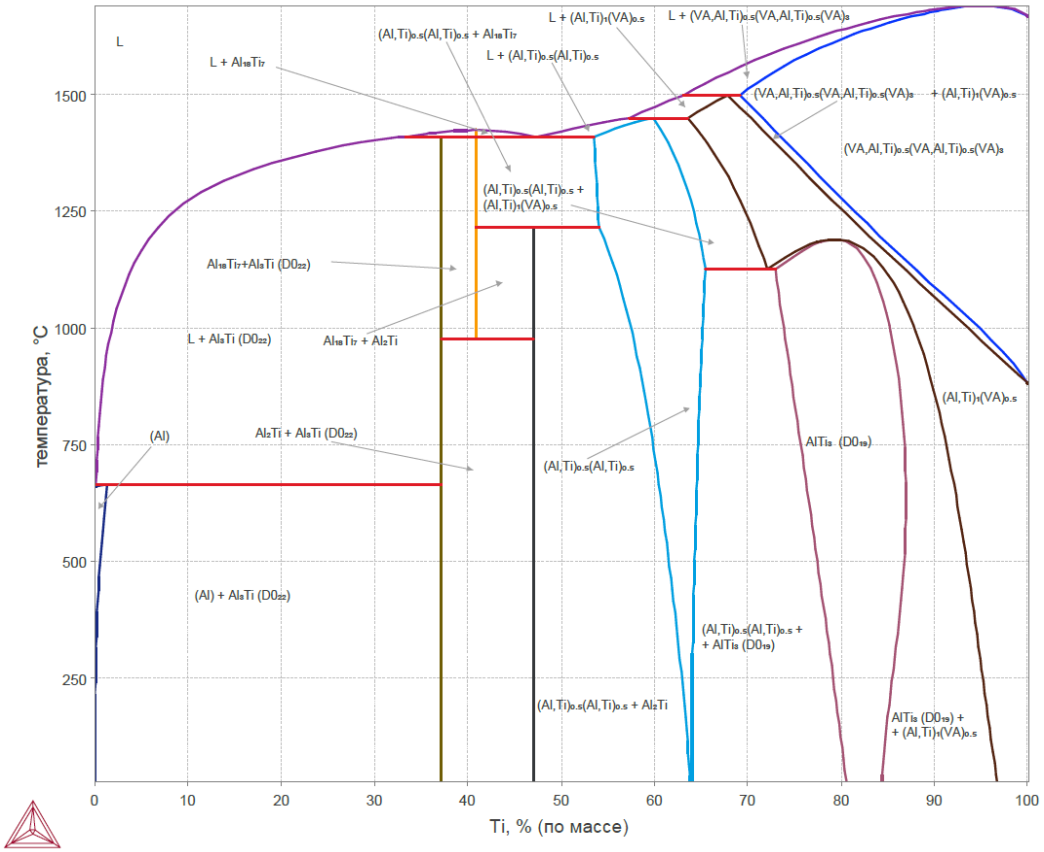


Рис. 1. Диаграмма состояния системы Al-Ti (Thermo-Calc, база TCAL4)

При практической реализации литейных технологий система находится в неравновесных условиях, поэтому процессы взаимодействия компонентов определяются кинетическими факторами. Одним из фундаментальных аспектов процессов структурообразования в системе алюминий–титан является диффузионное взаимодействие на границе раздела фаз [8]. Механизмы взаимной диффузии и химического взаимодействия определяют кинетику образования интерметаллических соединений, а также формирование переходных слоев, обеспечивающих межфазную связь между матрицей и армирующими частицами. Количественное описание таких процессов требует привлечения моделей, в частности, основанных на уравнениях Фика, а также термодинамических и кинетических зависимостях, связывающих скорость массопереноса с энергией активации и температурой [9]. Применение классического уравнения Аррениуса позволяет установить функциональную зависимость коэффициента диффузии от температуры, что дает возможность прогнозировать толщину диффузионных зон и характер межфазного взаимодействия при различных технологических режимах.

Несмотря на значительное число исследований, посвященных фазовым равновесиям в системе Al–Ti, остаются нерешенными вопросы количественной оценки скорости роста интерметаллических фаз в условиях, типичных для литейных процессов. Особый интерес представляет изучение кинетики диффузии в условиях ограниченного времени выдержки и высоких температур, когда устанавливается диффузионно-контролируемый режим массопереноса [10]. В этих условиях существенную роль играют параметры диффузии титана в алюминии, определяющие температурную зависимость коэффициента диффузии и динамику формирования переходной зоны. Моделирование межфазного взаимодействия в системе Al–Ti позволит уточнить закономерности формирования структуры при контакте расплава алюминия с частицами титана и установить связь между параметрами диффузии, морфологией микроструктуры и фазовым составом получаемых композитов.

Целью настоящей работы является расчетная оценка диффузионно-контролируемого межфазного взаимодействия в системе Al–Ti для количественного описания кинетики массопереноса, а также установление взаимосвязи между температурно-временными параметрами процесса и характеристиками диффузионных зон.

Методы

Для количественного описания межфазного взаимодействия при получении литых алюмоматричных композитов применяли модель диффузионного массопереноса, основанную на уравнениях Фика и кинетических уравнениях химической реакции [11]. В предположении, что скорость процесса лимитируется диффузией (диффузионно-контролируемый режим), поток вещества через границу раздела фаз описывается первым законом Фика:

$$J = -D\frac{dc}{dx}, \quad (1)$$

где J — плотность диффузионного потока, D — коэффициент диффузии, зависящий от температуры согласно уравнению Аррениуса:

$$D = D_0 e^{-\frac{E_0}{RT}} \quad (2)$$

где D_0 – константа (предэкспоненциальный фактор); E_0 – энергия активации диффузии.

Для оценки глубины проникновения вещества во времени применяется аналитическая форма решения второго закона Фика для полубесконечной области:

$$c = c_0(1 - erfZ) \quad (3)$$

$$Z = \frac{\bar{x}}{2\sqrt{Dt}} \quad (4)$$

где *erf Z* – функция ошибок Гаусса.

Расстояние L, на которое за время t продвигается фронт диффузии, определяли как $L = 5{,}6\sqrt{Dt}$. Заданный коэффициент 5,6 соответствует глубине проникновения вещества, при которой концентрация достигает 99,9% от начального значения. Другими словами, на глубине L концентрация снижается до 0,1% от значения на границе, то есть фактически это граница диффузионного фронта, после которой вещество можно считать практически отсутствующим. Кинетический анализ реакций на границе фаз включал сопоставление с моделью реакции первого порядка при наличии диффузионных ограничений. Значения предэкспоненциального фактора для титана принимали (D_0) 4,29 м^2/с·10^{-7}, а энергии активации диффузии (E_a) 36,3 кДж/моль.

Результаты и обсуждение

Расчетные зависимости коэффициента диффузии от температуры, ширины диффузионной зоны от времени выдержки и температуры для системы «алюминий-титан» представлены на рис. 2-5.

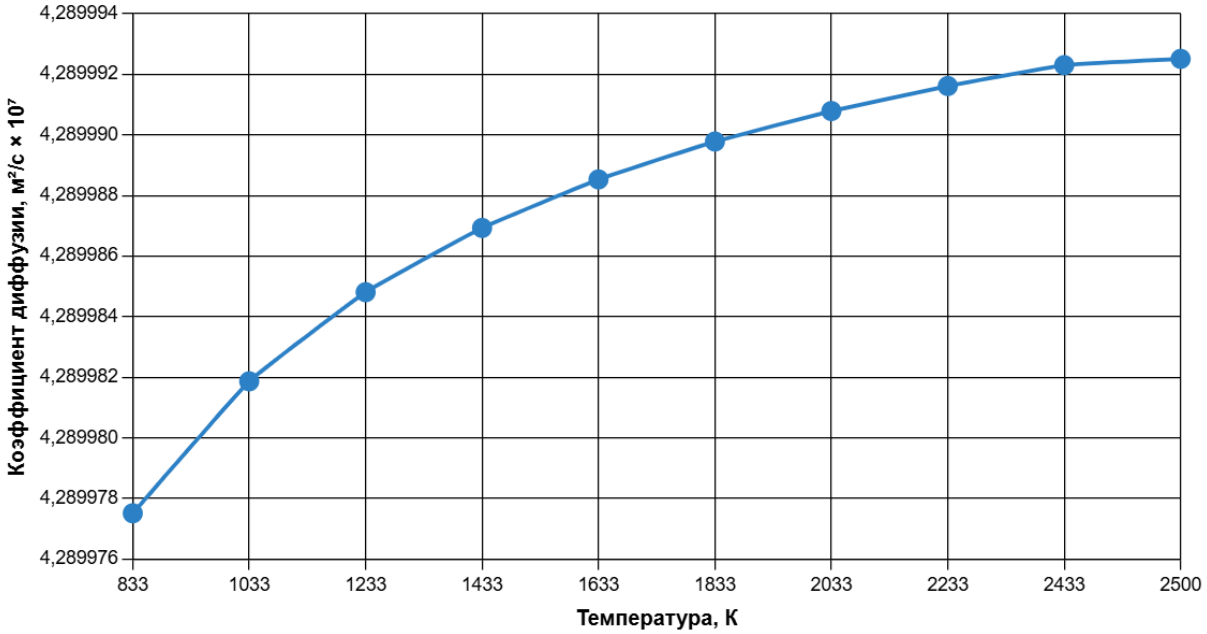


Рис. 2. Зависимость коэффициента диффузии от температуры в системе Al-Ti

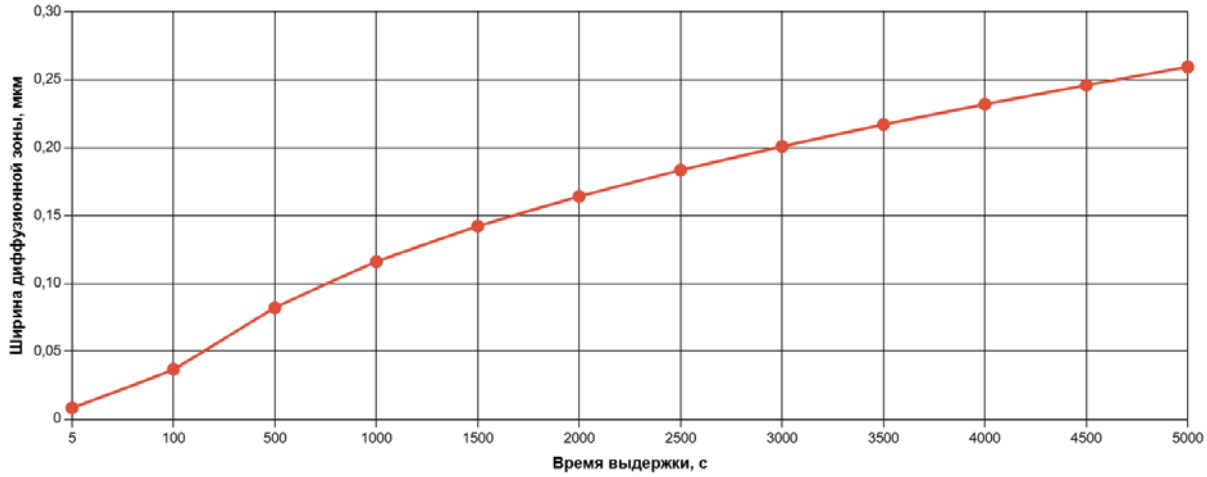


Рис. 3. Зависимость ширины диффузионной зоны в системе Al-Ti от времени выдержки при температуре 833 К

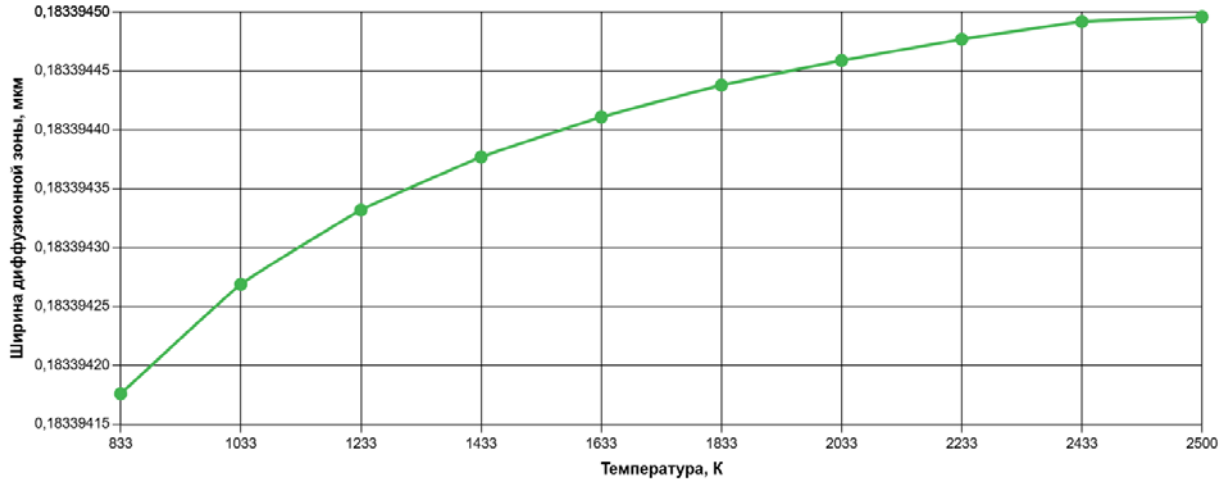


Рис. 4. Зависимость ширины диффузионной зоны в системе Al-Ti от температуры при выдержке 2500 секунд

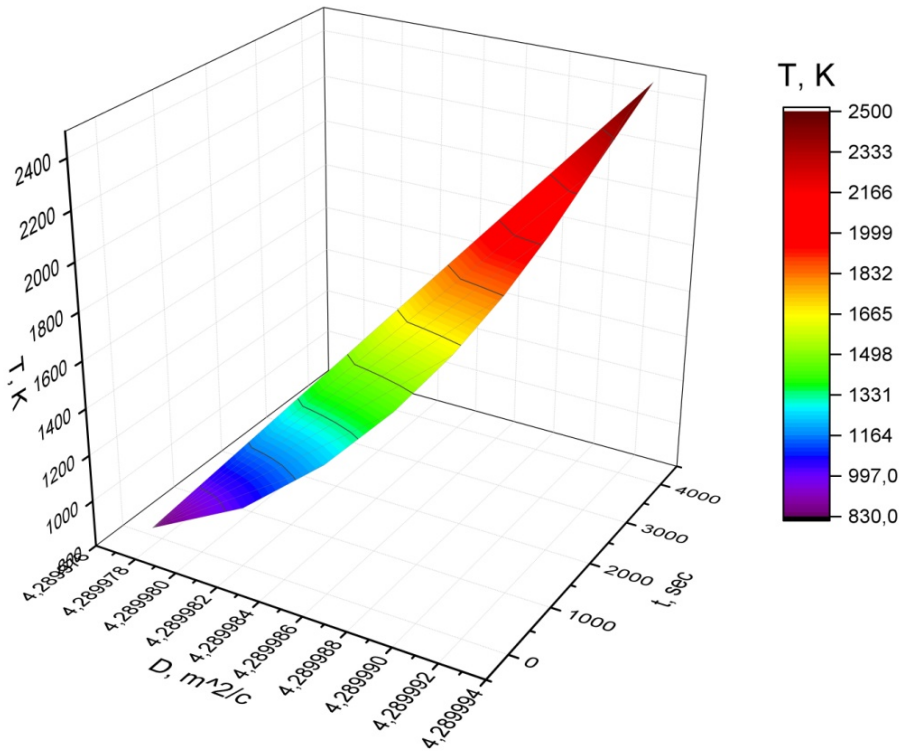


Рис. 5. Зависимость ширины диффузионной зоны от времени выдержки и температуры в системе Al-Ti

Анализ полученных данных показывает, что расчетный коэффициент диффузии титана в алюминии в рассмотренном температурном диапазоне (833 – 2500 К) изменяется незначительно в пределах от ~4,28998×10⁻⁷ м²/с до ~4,28999×10⁻⁷ м²/с. Наблюдаемый характер этой зависимости может указывать на то, что в заданном интервале температур наблюдается режим слабо выраженной термоактивации диффузионного процесса. При этом

температурный фактор оказывает значительно меньшее влияние, чем временной, что также согласуется с диффузионно-контролируемым механизмом массопереноса. Более интересными с практической точки зрения являются результаты расчетов ширины диффузионной зоны.

При этом следует отметить, что твердый титан активно химически реагирует в контакте с жидким алюминием с большим экзотермическим эффектом. Уже на ранних стадиях взаимодействия на границе раздела фаз происходит зарождение и рост интерметаллидных соединений типа Al_3Ti, AlTi и др. По-видимому, армирующие фазы алюминидов формируются в результате совместного действия двух механизмов, а именно, диффузии алюминия внутрь частиц титана и реакционного взаимодействия алюминия с поверхностью частиц [12]. Можно предположить, что на начальном этапе преобладает диффузионный перенос атомов алюминия в приповерхностные слои частиц титана, что обусловливает образование переходной зоны. По мере насыщения приграничных областей алюминием активизируется реакционно-диффузионный механизм с образованием устойчивого интерметаллидного слоя. В целом, полученные результаты указывают на то, что развитие диффузионной зоны в системе «алюминий – титан» определяется, с одной стороны, высокой химической активностью титана, способствующей образованию интерметаллидных фаз, а с другой – относительно низкой энергией активации процесса, обеспечивающей заметную диффузию даже при сравнительно невысоких температурах перегрева матричного расплава. Совокупное действие этих факторов объясняет возможность формирования прочной металлургической связи между компонентами даже при небольшой продолжительности контакта.

Полученные расчетные данные могут быть использованы для моделирования кинетики формирования межфазных слоев при получении литых алюмоматричных композиционных материалов с использованием порошкообразного титана как прекурсора для эндогенных армирующих фаз, а также для выбора рациональных параметров плавки и литья синтезируемых композитов.

Выводы

Показано, что в системе «алюминий – титан» процесс межфазного взаимодействия протекает по реакционно-диффузионному механизму. Расчетным путем установлены зависимости ширины диффузионной зоны от времени выдержки и температуры, свидетельствующие, что для достижения заданной глубины межфазного взаимодействия решающую роль играет продолжительность контакта фаз, в то время как повышение температуры в заданном интервале вносит сравнительно малый вклад. Полученные результаты могут служить основой для оптимизации составов и условий получения литых алюмоматричных композитов с эндогенными армирующими фазами.

Список использованной литературы

1. Mavhungu S.T., Akinlabi E.T., Onitiri M.A., Varachia F.M. Aluminum Matrix Composites for Industrial Use: Advances and Trends. Procedia Manufacturing 2017. Vol. 7. P. 178–182.
2. Senthil S., Raguraman M., Thamarai Manalan D. Manufacturing processes & recent applications of aluminium metal matrix composite materials: A review. Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 45, Part 7. P. 5934-5938.
3. Прусов Е.С., Панфилов А.А., Кечин В.А., Гаврилин И.В. Перспективы применения алюмоматричных композиционных сплавов в машиностроении // Литейщик России. 2012. № 9. С. 16-19.
4. Aikin R. M. The Mechanical Properties of In-Situ Composites // JOM. 1997. Vol. 49. P. 35-39.
5. Прусов Е.С., Панфилов А.А. Исследование свойств литых композиционных сплавов на основе алюминия, армированных эндогенными и экзогенными фазами // Металлы. 2011. № 4. С. 79-84.
6. Hu K., Zou C., Wang H., Wei Z. The role of in-situ Al_3Ti formed during solidification in improving the high-temperature properties of Al–Cu alloy // Materials Science and Engineering: A. 2024. Vol. 902. Article No. 146585.
7. Панфилов А.В., Прусов Е.С. О получении и свойствах комплексно-армированных композиционных материалов с алюминиевой матрицей // Литейное производство. 2008. № 8. С. 1-9.
8. Mirjalili M., Soltanieh M., Matsuura K., Ohno M. On the kinetics of $TiAl_3$ intermetallic layer formation in the titanium and aluminum diffusion couple // Intermetallics. 2013. Vol. 32. P. 297-302.
9. Barah O.O., Natukunda F., Bori I., Ukagwu K.J. Mechanisms and modelling of diffusion in solids: a multiscale framework with industrial case studies and AI enhancements // Discover Sustainability. 2025. Vol. 6. Article No. 804.
10. Gurevich L.M., Shmorgun V.G. Intermetallic Compound Formation During Reaction of Molten Aluminum with Titanium. Metallurgist. 2016. Vol. 59. P. 1221-1227.
11. Mitrovic J. The Fick and Lagrange equations as a basis for the Maxwell-Stefan diffusion equations // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1997. Vol. 40, Iss. 10. P. 2373-2377.
12. Прусов Е.С., Панфилов А.В., Панфилов А.А. Термодинамический анализ и модель взаимодействия компонентов при синтезе композиционных материалов на основе систем Al-TiO_2-B-SiC и Al-TiO_2-C-SiC // Литейщик России. 2009. № 9. С. 30-33.

УДК 669.715

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Шалимов Андрей Дмитриевич[1], аспирант кафедры информационных систем и технологий, **Прусов Евгений Сергеевич***[2], д.т.н., профессор кафедры технологий функциональных и конструкционных материалов

[1] Ярославский государственный технический университет (г. Ярославль, Московский пр., д. 88, 150023),
[2] Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000), eprusov@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены современные подходы к моделированию процессов кристаллизации и структурообразования алюминиевых сплавов. Проанализированы принципы термодинамического моделирования по методологии CALPHAD, показаны возможности ведущих коммерческих и открытых программных пакетов. Обсуждены направления интеграции термодинамических расчетов с методами фазового поля, вычислительной гидродинамики и машинного обучения при создании цифровых двойников алюминиевых сплавов и литейных процессов. Сформулированы направления дальнейшего развития открытых платформ CALPHAD-моделирования в рамках интегрированной парадигмы вычислительного материаловедения.
Ключевые слова: алюминиевые сплавы, термодинамическое моделирование, программное обеспечение, кристаллизация, структурообразование, фазовые составляющие

CONTEMPORARY METHODS FOR THE MODELING OF CRYSTALLIZATION AND MICROSTRUCTURE FORMATION PROCESSES IN ALUMINUM ALLOYS

Shalimov Andrey Dmitrievich [1], postgraduate student of the Department of Information Systems and Technologies, **Prusov Evgeny Sergeevich** *[2], Doctor of Science, Professor, Department of Functional and Structural Materials Technologies

[1] Yaroslavl State Technical University (Yaroslavl, Moskovsky ave., 88, 150023),
[2] Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, (Vladimir, 87, Gorky St., 600000), eprusov@mail.ru

Abstract. This paper examines contemporary approaches to modeling the crystallization and structure formation processes of aluminum alloys. It analyzes the principles of thermodynamic modeling following the CALPHAD methodology and outlines the capabilities of leading commercial and open-source software packages. The directions for integrating thermodynamic calculations with phase-field methods, computational fluid dynamics, and machine learning for creating digital twins of aluminum alloys and casting processes are discussed. Promising avenues for the further development of open CALPHAD modeling platforms within the integrated paradigm of computational materials science are delineated.
Keywords: aluminum alloys, thermodynamic modeling, software, crystallization, structure formation, phase components

Введение

Процессы кристаллизации сплавов и затвердевания отливок лежат в основе управляемого формирования структуры и заданных свойств литых изделий из металлических материалов [1]. В этой связи понимание фундаментальных взаимосвязей между процессами затвердевания и структурообразованием сплавов в отливках, в частности, на основе алюминия, имеет важное значение для обеспечения требуемого качества выпускаемой продукции. За последние несколько десятилетий достигнут значительный прогресс в развитии численных методов моделирования процессов кристаллизации алюминиевых сплавов и затвердевания отливок в условиях реализации различных технологий литейного производства (литье в песчаные формы, кокильное и центробежное литье и др.) [2-4]. В центре внимания ведущих мировых научных коллективов остаются вопросы термодинамики кристаллизации сплавов, тепло- и массопереноса при затвердевании отливок, зародышеобразования и роста макрозерна, эволюции микроструктуры, образования эвтектик, перитектик, монотектик и интерметаллидных фаз, процессы микро- и макросегрегации, образования и прогнозирования литейных дефектов (усадочные процессы, формирование пористости и т.д.) и др. [5-7].

В последние годы наблюдается интеграция классических физико-химических моделей кристаллизации с вычислительными методами, основанными на принципах термодинамического анализа. Особенно широкое распространение получили подходы, реализующие методологию CALPHAD (CALculation of PHAse Diagrams), что позволяет с высокой точностью описывать равновесные и неравновесные фазовые превращения в многокомпонентных системах [8]. Использование таких подходов открывает возможности для прогнозирования формирования и эволюции структурных составляющих алюминиевых сплавов при различных технологических воздействиях путем построения термодинамических баз данных и расчета фазовых равновесий [9].

Настоящая работа направлена на анализ современного состояния и определение перспективных направлений развития моделирования

кристаллизации и структурообразования алюминиевых сплавов с применением методов и инструментов компьютерной геометрической термодинамики.

Роль термодинамического моделирования в моделировании кристаллизации алюминиевых сплавов

Методология CALPHAD была предложена Ларри Кауфманом в 1960-х годах. Первоначально CALPHAD развивался как инструмент для термодинамического моделирования бинарных и тройных систем на основе экспериментальных данных и фундаментальных законов химической термодинамики. В последующие десятилетия методология эволюционировала в сторону комплексного подхода к описанию многокомпонентных систем с использованием оптимизированных баз данных и компьютерных алгоритмов расчета фазовых равновесий [10]. К началу XXI века методология CALPHAD стала неотъемлемым элементом интегрированной вычислительной материаловедческой парадигмы (ICME), а в последние годы активно комбинируется с методами машинного обучения, что существенно расширяет возможности прогнозирования структуры и свойств сплавов еще на стадии их проектирования.

На рис. 1 приведены сводные данные о количестве научных публикаций, посвященных использованию метода CALPHAD для различных аспектов исследования алюминиевых сплавов, за период с 1977 по 2025 годы (по данным международной базы Scopus). С начала 2000-х годов наблюдается устойчивый рост числа документов, а приблизительно после 2013 года этот рост принял экспоненциальный характер. К 2025 году годовое количество публикаций превысило 1900, что свидетельствует о возрастающем интересе научного сообщества к применению CALPHAD-подходов для моделирования и анализа фазовых равновесий при разработке новых составов алюминиевых сплавов и технологий их плавки и литья. Следует отметить, что Китай, США и Германия стабильно удерживают позиции мировых лидеров по числу опубликованных работ по данной тематике.

Очевидный рост научного интереса к методологии CALPHAD в значительной степени обусловлен активным развитием специализированного программного обеспечения, что позволило сделать сложные термодинамические расчеты доступными для широкого круга исследователей и практикующих специалистов. В настоящее время на мировом рынке представлено несколько мощных программных пакетов для термодинамического моделирования (табл. 1).

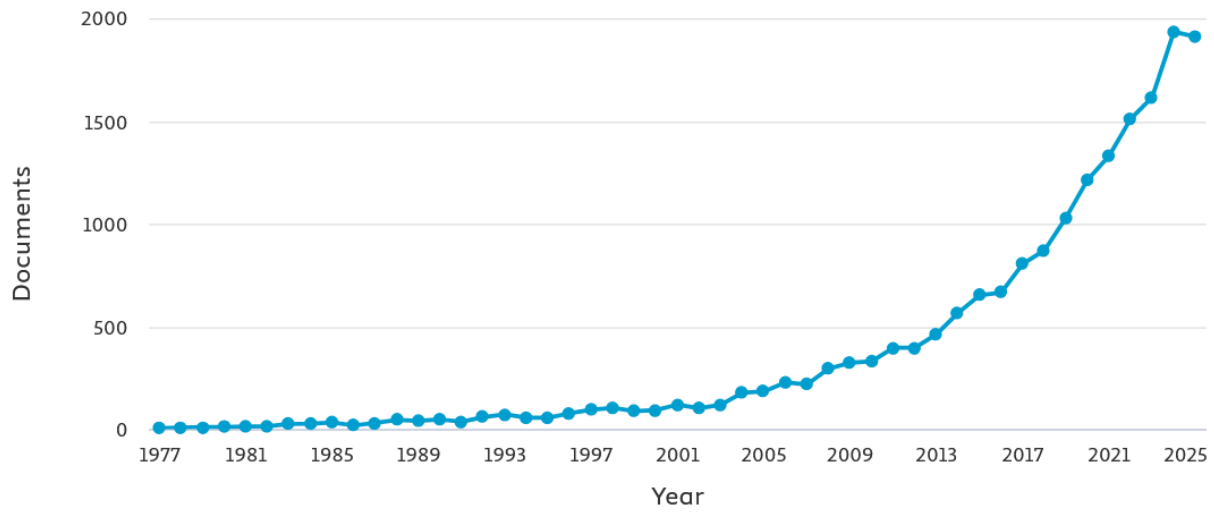


Рис. 1. Публикационная активность по вопросам применения методологии CALPHAD для различных задач, связанных с алюминиевыми сплавами (по данным базы Scopus)

Таблица 1. Сравнительные характеристики коммерческих программных пакетов для термодинамического моделирования сплавов

Пакет	Производитель (распространитель)	Основной функционал	Базы данных
Thermo-Calc	Thermo-Calc Software AB (Швеция)	Расчет диаграмм состояния многокомпонентных систем, моделирование неравновесной кристаллизации по Шейлю-Гулливеру, прогнозирование свойств фаз (энтальпия, теплоемкость), кинетическое моделирование (DICTRA)	TCB (общая металлургия), TCFE (Fe-сплавы), TCNI (Ni-сплавы), TCAL (Al-сплавы), MOB (кинетика) и др.

Продолжение таблицы 1

FactSage	CRCT (Канада), GTT-Technologies (Германия)	Комбинированное термодинамическое и термохимическое моделирование для металлургических, шлаковых, оксидных и реакционных систем; вычисление равновесий с газовой фазой; поддержка реакционной термохимии и моделирования процессов плавки, рафинирования и шлакообразования	Обширные базы данных по оксидам, шлакам, солям, металлическим сплавам (FToxid, FTmisc, FTsalt)
PANDAT	CompuTherm LLC (США)	Реализация CALPHAD с расширенным функционалом оптимизации параметров и расчета кинетики осаждения; включает модули PanEngine (фазовые равновесия), PanOptimizer (байесовская оптимизация), PanPrecipitation (осаждение фаз) и др.	Собственные базы данных для широкого круга сплавов (Al, Mg, Fe, Ni, Ti, Cu и др.), включая многокомпонентные системы

Продолжение таблицы 1

JMatPro	Sente Software Ltd (Великобритания)	Инженерный инструмент на основе CALPHAD и эмпирических моделей; прогнозирование фазовых диаграмм, TTT/CCT, свойств при термообработке, фазовых превращений, механических и физических характеристик	Коммерческие базы свойств и фазовых равновесий, рассчитанные на практические инженерные задачи
MatCalc	MatCalc Engineering GmbH (Австрия)	Моделирование многокомпонентных фазовых равновесий, кинетика фазовых превращений, эволюция микроструктуры в твердых системах (рост зерен, рекристаллизация и др.)	MatCalc Database (MC_Base), MC_Fe, MC_Al, MC_Ni и др.; совместим с форматом TDB
MTDATA	National Physical Laboratory (Великобритания)	Термодинамическое моделирование для промышленности с поддержкой стандартов ISO и ASTM, в т.ч. построение фазовых диаграмм, моделирование процессов с учетом химических реакций	Базы данных NPL, совместимость с другими форматами

В обзоре [11] рассмотрены многочисленные примеры использования некоторых из приведенных программных средств, подтверждающие, что метод CALPHAD является мощным инструментом для проектирования перспективных составов алюминиевых сплавов. На примере силуминов и естественных композитов показано, что CALPHAD адекватно прогнозирует структуру алюминиевых сплавов в литом состоянии для широкого диапазона

составов и применяемых методов литья, хотя и требует учета поправок на диффузию в твердом состоянии. Метод также применим для прогнозирования кинетики выделения фаз, в том числе в сложных многокомпонентных системах.

Несмотря на широкие функциональные возможности, распространение и применение обозначенных инструментов термодинамического моделирования сопряжено с двумя фундаментальными барьерами. Во-первых, нельзя обойти вниманием исключительно высокую стоимость коммерческих лицензий, делающую их недоступными для значительной части научного и инженерного сообщества. Кроме того, в условиях текущих геополитических реалий прямые продажи и техническая поддержка большинства западных программных продуктов для российских организаций либо полностью запрещены, либо существенно затруднены.

В этой связи активное использование и развитие открытых программных пакетов, таких как OpenCalphad, который основан на тех же термодинамических принципах и позволяет создавать собственные базы данных, следует рассматривать в качестве основного пути для преодоления вышеуказанных ограничений.

Развитие открытых программных средств для моделирования процессов кристаллизации и структурообразования

Применение программного обеспечения с открытым исходным кодом (Free and Open-Source Software, FOSS) для решения различных задач, связанных с моделированием процессов кристаллизации сплавов и затвердевания отливок, способствует созданию устойчивой экосистемы научных вычислительных пакетов, свободных от ограничений проприетарных «черных ящиков». Децентрализованная модель разработки обеспечивает непрерывный приток разнообразных методологических идей и ускоряет эволюцию алгоритмов за счет коллективной валидации и независимого тестирования [12], что особенно критично в задачах многомасштабного и мультифизического моделирования, где ошибки исходной модели или ее программной реализации приводят к принципиально различающимся физическим прогнозам [13,14]. Систематическое открытое распространение научного кода резко сокращает время обнаружения и локализации ошибок, повышает воспроизводимость результатов и делает возможным объективный выбор между конкурирующими моделями на основе повторяемых бенчмарков с учетом последующей верификации экспериментальными данными.

Обзор литературных данных позволяет заключить, что в последние годы в области моделирования кристаллизации и эволюции микроструктуры алюминиевых сплавов сформировался работоспособный комплекс взаимосвязанных инструментов с открытым исходным кодом, включающий следующие ключевые уровни:

(1) термодинамическое моделирование (по методологии CALPHAD, реализованной, в частности, в пакетах pycalphad и OpenCalphad);

(2) мезоскопическое моделирование на основе метода фазового поля (с использованием платформ PRISMS-PF, MOOSE, FiPy);

(3) макроскопическое моделирование (средствами вычислительной гидродинамики, такими как OpenFOAM и др.).

Данный инструментарий дополняется средствами верификации моделей и обеспечения воспроизводимости результатов (например, через платформы PFHub и GitHub). Обозначенный комплекс инструментов позволяет проводить компьютерное моделирование различных процессов при кристаллизации и затвердевании, включая тепломассоперенос в расплаве, зарождение и рост дендритов и иных структурных составляющих, динамику границы раздела твердой и жидкой фаз, формирование дефектов структуры и др.

В настоящее время активно развиваются открытые программные средства, реализующие методологию CALPHAD для термодинамического моделирования многокомпонентных систем и сплавов. Эти пакеты обеспечивают возможность расчета фазовых равновесий, построения фазовых диаграмм, оптимизации параметров термодинамических моделей, интеграции с данными ab initio и экспериментальными результатами. В табл. 2 представлены наиболее распространенные открытые решения, отличающиеся языком реализации, функциональными возможностями и степенью интеграции с другими вычислительными платформами.

Среди перечисленных программных пакетов OpenCalphad выделяется как наиболее развитая и полнофункциональная открытая реализация методологии CALPHAD. Программное обеспечение имеет модульную архитектуру и включает следующие компоненты [15-17]:

(1) базовые библиотеки для численных методов и взаимодействия с пользователем;

(2) общий термодинамический модуль (General Thermodynamic Package, GTP), реализующий термодинамические модели;

(3) программное обеспечение «Минимизатор Хиллерта» (Hillert Minimizer Software, HMS) для расчета равновесий;

(4) модуль Step, Map and Plot (SMP) для пошагового расчета, построения карт и графиков, связанный с графическим программным обеспечением GNUPLOT;

(5) инструменты оценки параметров моделей (часть нескольких модулей) для обработки экспериментальных и теоретических данных с целью определения параметров термодинамических моделей;

(6) программный интерфейс приложений (OCASI), предназначенный для предоставления термодинамических данных другому программному обеспечению, включая поддержку многопоточности и привязку isoC для языков C++ и др.

Опыт показывает, что OpenCalphad наиболее перспективен для выполнения расчетов равновесия многокомпонентных систем с гибким набором условий, а также для построения диаграмм свойств и равновесных

фазовых диаграмм [18]. Пример рассчитанной равновесной фазовой диаграммы системы Al-Ni приведен на рис. 2.

Таблица 2. Открытые программные средства для термодинамического моделирования сплавов по методологии CALPHAD

Пакет	Язык реализации	Основной функционал	Особенности
OpenCalphad (OC)	Fortran / C++	Расчет фазовых равновесий, построение бинарных, тройных и многокомпонентных диаграмм состояния, определение термодинамических свойств (G, H, Cp) с поддержкой формата TDB	Один из самых мощных и полных открытых пакетов; имеет интерфейс командной строки и внешние GUI
pycalphad	Python	Библиотека для CALPHAD-моделирования, построения фазовых диаграмм, расчета свойств	Программируемый доступ через Python, поддержка TDB, интеграция с UQ
ESPEI (Extensible Self-optimizing Phase Equilibria Infrastructure)	Python	Параметрическая оптимизация баз CALPHAD, байесовский анализ, интеграция с pycalphad	Используется для построения и оптимизации баз данных с применением экспериментов и DFT

Точность расчетов по методу CALPHAD напрямую зависит от качества используемых термодинамических баз данных. Несмотря на то, что программное ядро pycalphad, OpenCALPHAD и др. открыто, подавляющее большинство наиболее полных баз данных остаются коммерческими, что ограничивает их применение. Тем не менее, активно развивается сообщество, поддерживающее открытые базы данных для различных многокомпонентных систем, что создает предпосылки для обеспечения воспроизводимости CALPHAD-ориентированных исследований в открытой среде.

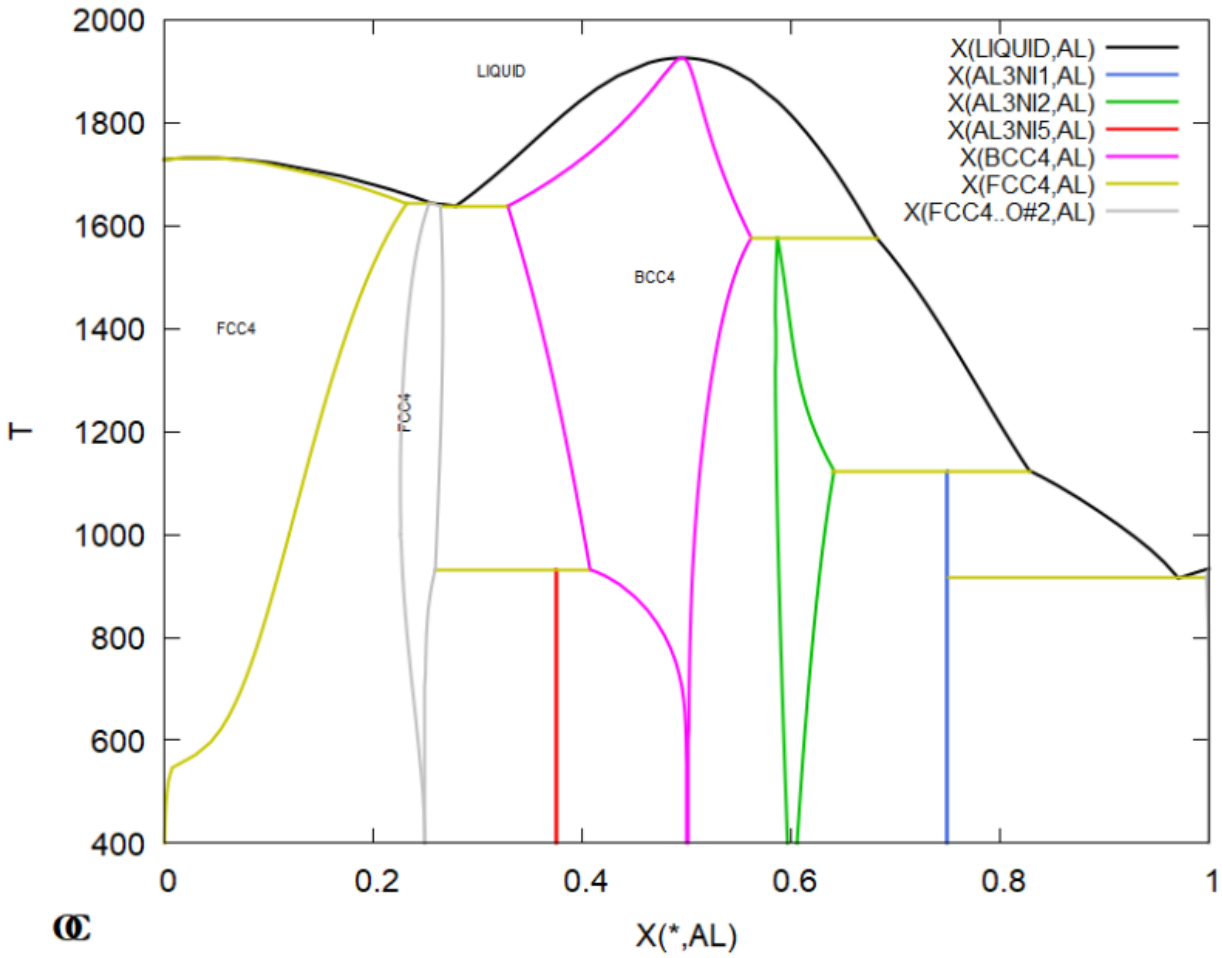


Рис. 2. Равновесная фазовая диаграмма системы Al-Ni, рассчитанная в OpenCalphad

Несмотря на высокий уровень технической зрелости, достигнутый к настоящему времени многими FOSS-проектами, одним из ключевых стратегических вызовов остается построение не просто активного, но архитектурно и социально устойчивого сообщества. Для того, чтобы ПО с открытым исходным кодом стало действительно эффективным инструментом ускорения научного прогресса в таких областях, как изучение фундаментальных механизмов кристаллизации и структурообразования сплавов, требуется скоординированная стратегия, включающая по меньшей мере следующие позиции:

(1) многоуровневая институциональная и грантовая поддержка разработки базовых библиотек и инфраструктуры (в том числе поддержание серверов тестов, хостинга репозиториев, разработку модульных интерфейсов и др.);

(2) внедрение обязательных практик документирования и публикации рабочих примеров с воспроизводимыми входными данными и сценариями (контейнеры, описания параметров в стандартизованном формате);

(3) стимулирование вклада разработчиков через формальное признание в академических оценках (четкие правила цитирования кода и фиксации вкладов, например, через механизмы типа CRediT);

(4) организация регулярных мероприятий для развития сообщества, в частности, специализированных конференций, форумов, учебных семинаров, хакатонов и др., направленных на снижение порога входа для новичков и обмен передовым опытом между разработчиками.

Особо следует отметить, что такие мероприятия служат не только образовательной цели и продвижению FOSS-проектов, в том числе с позиций привлечения новых разработчиков, но и являются по сути своего рода «инкубаторами» для следующих поколений мейнтейнеров, обеспечивая долгосрочную жизнеспособность критически важных для научного прогресса вычислительных инструментов.

Одновременно с этим наблюдается сближение теоретических и прикладных направлений моделирования, что выражается в формировании концепции «цифрового двойника» материала или технологического процесса. Эта концепция базируется на сочетании физико-математических моделей кристаллизации, термодинамических баз данных (CALPHAD), методов вычислительной гидродинамики (CFD), конечно-элементных моделей (FEM), а также инструментов машинного обучения и искусственного интеллекта [19-21]. В результате становится возможным создание цифровых платформ, способных в реальном времени прогнозировать, к примеру, морфологию микроструктуры и формирование дефектов, обеспечивая тем самым переход от традиционной металлургии и литейного производства к интеллектуальным системам управляемого структурообразования алюминиевых сплавов нового поколения.

Выводы

Показано, что что современные методы компьютерного моделирования, основанные на методологии CALPHAD, стали неотъемлемым инструментом проектирования новых алюминиевых сплавов и оптимизации технологий их плавки и литья. Одним из наиболее перспективных направлений в текущих условиях является развитие открытых альтернатив коммерческим пакетам, в частности, таких как OpenCalphad, функциональные возможности которого адекватны задачам расчета фазовых равновесий и построения диаграмм состояния многокомпонентных систем. Дальнейший прогресс в области моделирования кристаллизации и структурообразования будет определяться комплексным использованием открытых инструментов моделирования на микро-, мезо- и макромасштабных уровнях в сочетании с технологиями машинного обучения, а также системной работой в направлении создания открытых баз данных.

Список использованной литературы

1. Dantzig J.A., Rappaz M. Solidification. Taylor & Francis, Lausanne (2009).

2. Cusato N., Nabavizadeh S.A., Eshraghi M. A Review of Large-Scale Simulations of Microstructural Evolution during Alloy Solidification. Metals. 2023. Vol. 13. Article No. 1169.

3. Oxley S., Haigh P.M. The use of different computer simulation software packages to predict casting filling and solidification. Foundry Trade Journal. 2007. Vol. 181 (3647). P. 269–271.

4. Luo A.A., Sachdev A.K., Apelian D. Alloy development and process innovations for light metals casting. Journal of Materials Processing Technology. 2022. Vol. 306. Article No. 117606.

5. Zhang A., Guo Z., Jiang B., Xiong S., Pan F. Numerical solution to phase-field model of solidification: A review. Computational Materials Science. 2023. Vol. 228. Article No. 112366.

6. Chen Z., Li Y., Zhao F., Li S., Zhang J. Progress in numerical simulation of casting process. Measurement and Control. 2022. Vol. 55(5-6). P. 257-264.

7. Jolly M., Katgerman L. Modelling of defects in aluminium cast products. Progress in Materials Science. 2022. Vol. 123. Article No. 100824.

8. Kattner U.R. The CALPHAD method and its role in material and process development. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. 2016. Vol. 13(1). P. 3-15.

9. Prusov E.S., Kechin V.A., Deev V.B., Shurkin P.K. Thermodynamics of the effect of alloying of phase formation during crystallization of aluminum matrix composites with exogenous reinforcement. Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2022. Vol. 63. No. 6. P. 631-640.

10. Gorsse S., Senkov O.N. About the Reliability of CALPHAD Predictions in Multicomponent Systems. Entropy. 2018. Vol. 20(12). Article No. 899.

11. Jung J.-G., Cho Y.-H., Lee J.-M., Kim H.-W., Euh K. Designing the composition and processing route of aluminum alloys using CALPHAD: Case studies. Calphad. 2019. Vol. 64. P. 236-247.

12. Kühbach M., London A.J., Wang J., Schreiber D.K., Martin F.M., Ghamarian I., Bilal H., Ceguerra A.V. Community-Driven Methods for Open and Reproducible Software Tools for Analyzing Datasets from Atom Probe Microscopy. Microscopy and Microanalysis. 2022. Vol. 28, Iss. 4. P. 1038–1053.

13. Rolchigo M., Reeve S.T., Stump B., Coleman J., Plotkowski A. ExaCA v2.0: A versatile, scalable, and performance portable cellular automata application for additive manufacturing solidification. Computational Materials Science. 2025. Vol. 251. Article No. 113734.

14. Fattebert J.-L., DeWitt S., Perron A., Turner J. Thermo4PFM: Facilitating Phase-field simulations of alloys with thermodynamic driving forces. Computer Physics Communications. 2023. Vol. 288. Article No. 108739.

15. Sundman B., Kattner U.R., Palumbo M., Fries S.G. OpenCalphad – a free thermodynamic software. Integrating Materials and Manufacturing Innovation. 2015. Vol. 4. P. 1-15.

16. Sundman B., Liu X.-L., Ohtani H. The implementation of an algorithm to calculate thermodynamic equilibria for multi-component systems with non-ideal phases in a free software. Computational Materials Science. 2015. Vol. 101. P. 127-137.

17. Sundman B., Kattner U.R., Sigli C., Stratmann M., Le Tellier R., Palumbo M., Fries S.G. The OpenCalphad thermodynamic software interface. Computational Materials Science. 2016. Vol. 125. P. 188-196.

18. Прусов Е.С. Применение открытого программного обеспечения OpenCalphad для термодинамического моделирования в металлургии и материаловедении. В сб.: Современные технологии в машиностроении и литейном производстве. Материалы IV Международной научно-практической конференции. 2018. С. 256-260.

19. Campbell C.E., Kattner U.R., Liu Z.K. The development of phase-based property data using the CALPHAD method and infrastructure needs. Integrating Materials and Manufacturing Innovation. 2014. Vol. 3. P. 158-180.

20. Zhu S., Sarıtürk D., Arróyave R. Accelerating CALPHAD-based phase diagram predictions in complex alloys using universal machine learning potentials: Opportunities and challenges. Acta Materialia. 2025. Vol. 286. Article No. 120747.

21. Shen C. The synergy of machine learning and CALPHAD: Revitalizing traditional approaches. Computational Materials Science. 2025. Vol. 258. Article No. 113970.

Научное издание

International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering (MPCPE-2025)

Сборник трудов
VI МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

28-30 апреля 2025 г.
Владимир

Печатается в авторской редакции

За содержание статей, точность приведенных фактов и цитирование несут ответственность авторы публикаций

Компьютерная верстка Д. В. Рева

Подписано в печать 17.11.2025.
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 25,34.
Тираж 200 экз.
Заказ № 16616

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ООО «Аркаим»
Россия, г. Владимир, ул. Кирова, 14г
Тел.: 8 (4922) 53-41-50
E-mail: print@arkprint.ru