Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ

Сборник научных трудов
по материалам IV Всероссийской
молодежной конференции

Саратов, 21-22 мая 2025 г.

Саратов 2025

УДК 62-4, 615.46, 539.5, 666.3
ББК 30.3
П 26

П 26 **Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки:** сб. материалов IV Всерос. молодеж. конф., Саратов, 21-22 мая 2025 г. / под. общ. ред. д-ра техн. наук, доцента А.А. Фомина. Саратов: СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2025. 277 с.
ISBN 978-5-7433-3663-0

В сборнике представлены материалы IV Всероссийской молодежной конференции «Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки», проходившей 21-22 мая 2025 г. в Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. в соответствии с приказом СГТУ № 211-П от 24.03.2025 г. Основной задачей конференции являлось представление и обсуждение новейших научных результатов фундаментальных исследований и практических достижений в области материаловедения, медицинской техники и процессов обработки материалов.

Сборник предназначен для широкой аудитории читателей, в частности студентов, аспирантов и молодых ученых, интересующихся современными проблемами науки.

Организационный комитет:
д.т.н., доцент Фомин А.А.; д.т.н., с.н.с. Пичхидзе С.Я.;
д.т.н., профессор Таран В.М.; к.т.н., доцент Решетникова О.П.;
д.ф.-м.н., профессор Вениг С.Б.; к.ф.-м.н. Захаревич А.М.;
к.т.н. Кошуро В.А.; к.т.н. Шумилин А.И.; к.т.н. Щелкунов А.Ю.,
к.т.н. Егоров И.С., к.т.н. Маркелова О.А.

Одобрено
редакционно-издательским советом
Саратовского государственного технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Ответственность за содержание и достоверность сведений, представленных в материалах конференции, сохранение корпоративной и государственной тайн возлагается на авторов

УДК 62-4, 615.46, 539.5, 666.3
ББК 30.3

© Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2025

ISBN 978-5-7433-3663-0

СОДЕРЖАНИЕ

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КРУГЛОСТИ НА КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ
Александров Д.А. 9

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕКУРСОРА НА СВОЙСТВА ДВУХФАЗНЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ФЕРРОНИОБАТА-ТИТАНАТА СВИНЦА И МОДИФИЦИРОВАННОГО ФЕРРИТА НИКЕЛЯ
Александрова И.А., Давыдова А.А., Шептун И.Г., Решетникова Е.А. 12

ПЕРСПЕКТИВЫ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ РОДА *CHLORELLA* КАК ИСТОЧНИКА ЦЕННОГО УГЛЕВОДНОГО СЫРЬЯ
Беляева А.О., Болтенков В.В., Пилигаев А.В. 16

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ НАГРУЗКИ НА ИМПЛАНТАТ ТИТАНОВОЙ ПЛАСТИНЫ ГОЛЕНИ ДЛЯ ОСТЕОСИНТЕЗА
Бережная А.С. 19

БЕСЦВЕТНОЕ СТЕКЛО В СИСТЕМЕ Bi_2O_3-GeO_2
Бермешев Т.В., Бундин М.П., Хлыстов Д.В. 23

СОЕДИНЕНИЕ $Bi_4Ge_3O_{12}$. СИНТЕЗ. УЛУЧШЕНИЕ
Бермешев Т.В. 25

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ВНУТРЕННИМ ПРОТЕКТОРОМ
Бижанов Д.Е., Ромашев Д.В. 29

ПРОИЗВОДСТВО КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ
Бижанов Д.Е., Ромашев Д.В. 31

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ КРЕМНИЕВОЙ *N-I-P* НАНОСТРУКТУРЫ
Володин В.С., Дреев Г.Д. 34

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДИСКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ
Вай Ян Лин 37

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ОСАДКЕ ПРЕССОВАНИЕМ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ЦИРКОНИЯ МАРКИ Э110
Новиков К.А., Войко А.В. 40

ЛОКАЛЬНОЕ АТОМНОЕ СТРОЕНИЕ $Mo_{1.33}CT_x$ И V_2CT_x
Грапенко О.Ю., Цыганов А.Р. 44

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА НЕФТЕПРОДУКТОВ. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ОПТИМИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИИ
Гришанов А.А., Кикоть Д.С., Смирнов М.С. 46

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ FDM-ПЕЧАТИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ
Грозный А.И. 49

ПРОЦЕСС ОБРАБОТКИ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
С ПОМОЩЬЮ ИНСТРУМЕНТОВ СВЁРТОЧНОЙ НЕЙРОСЕТИ MATLAB
Дасаева А.И. 53

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ НАГРУЗКИ НА ОКОННУЮ СЕТКУ
Жданов И.А. 57

ИССЛЕДОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННОГО
ПОЛИТИТАНАТА КАЛИЯ РАЗЛИЧНЫМИ СОЛЯМИ ТРЕХВАЛЕНТНОГО ЖЕЛЕЗА
Завитаева Д.Д. 61

СОЗДАНИЕ ПРИВОДА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БПЛА
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ
Здобников И.С. 65

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ИМПУЛЬСНОГО
МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, КОЭФФИЦИЕНТ
ТРЕНИЯ И АДГЕЗИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ ПОКРЫТИЙ $Zr_{1-X}Al_XN$
Клочков А.Ю. 68

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ПОЛИАНИЛИНА И УГЛЕРОДНЫХ
НАНОТРУБОК В ГИБРИДНЫХ ПЛЕНКАХ
Каратышова Т.Я., Хассун О.А., Миронюк В.Н., Глуховской Е.Г. 71

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА РЕГРЕССИИ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ КОРРЕЛЯЦИИ
ДЛЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ
Каунг Кхант Аунг 73

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ МДО НА СВОЙСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ ПОКРЫТИЙ
Киселев И.В., Кривенков А.О., Душинов А.Г. 77

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЖИДКОФАЗНОГО ПЕРОКСИДНОГО
ОКИСЛЕНИЯ ФЕНОЛА В ПРИСУТСТВИИ КАТАЛИЗАТОРОВ
НА ОСНОВЕ ПИЛЛАРИРОВАННЫХ ГЛИН
Медведева Т.Б., Клочихина А.С., Панченко В.Н., Тимофеева М.Н., Громов Н.В. .. 81

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПРОВОЛОК ИЗ СПЛАВА Al-0.26Zr
ПРИ КОМНАТНОЙ И ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ
Комельков А.В., Нохрин А.В., Бобров А.А., Сысоев А.Н., Шишулин Е.О.,
Морозкина Е.О. 84

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКЕ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ
Оленин В.Д. 87

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ЗАХВАТА И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ
АККУМУЛЯТОРА ДЛЯ СТАНЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАМЕНЫ
АКБ БПЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ
Кривоножкин Д.В. 90

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ ПОЛУЧЕНИЯ
АЛЮМИНИЕВЫХ БРОНЕВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ВООРУЖЕНИЙ
Крюков Д.Б. 95

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОАГУЛЯЦИИ ЖИДКИХ СТОКОВ
В ПРИСУТСТВИИ ПОДЩЕЛАЧИВАЮЩЕГО РЕАГЕНТА ИЗ ФОСФОГИПСА
Монастырский Д.И. 98

НООМЕТРИЯ МОЗГА: МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
Мартюшева П.С. 100

ЭФФЕКТ ДЛИНЫ АЛКИЛЬНОЙ ГРУППЫ НА КАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИМИДАЗОЛИЕВЫХ СОЛЕЙ ФОСФОРНО-ВОЛЬФРАМОВОЙ ГЕТЕРОПОЛИКИСЛОТЫ В РЕАКЦИИ СИНТЕЗА 1-МЕТОКСИ-2-ПРОПАНОЛА ИЗ ПРОПИЛЕН ОКСИДА И МЕТАНОЛА
Мванги Дж.В., Приходько С.А., Панченко В.Н., Шефер К.И., Тимофеева М.Н. 103

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ БИОМАТЕРИАЛЫ: ТЕХНИКИ, ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ
Моргунов Н.Р., Сеченева Е.В. 106

ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ОЖЕЛЕЗНЕННОГО ПОЛИТИТАНАТА КАЛИЯ В МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ПОЧВА-БЕНЗИН
Мордвинкин В.А. 108

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛДЕНФТОРИДА
Набутова К.В., Яхина Г.С. 111

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ФИКСИРОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ПОМОЩЬЮ КРИВОШИПНО-ПОЛЗУННОГО МЕХАНИЗМА ДЛЯ СТАНЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАМЕНЫ АКБ БПЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ 3-D ПЕЧАТИ
Пачколин К.П. 114

ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ Ni-СОДЕРЖАЩИХ МУЛЬТИФЕРРОИЧНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ ФЕРРИТА ВИСМУТА, ЛЕГИРОВАННОГО СЕГНЕТОАКТИВНЫМИ КАТИОНАМИ Ti4+, Nb5+ И W6+
Поподько Д.О. 116

ВЗАИМОСВЯЗЬ АНОМАЛИЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРОДУКТОВ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ОТЖИГА И ОТПУСКА СТАЛЕЙ ПРИ ~ 650 °С С ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ЖЕЛЕЗА
Рафиков А.Р., Шахназаров К.Ю. 120

АНАЛИЗ ТИПОВ НАНОМАТЕРИАЛОВ И ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО СФЕРАМ ПРИМЕНЕНИЯ
Рупшис Н.А. 123

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МАЛОШУМНОГО ВОЗДУШНОГО ВИНТА МАЛОГАБАРИТНЫХ БАС С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ 3-D ПЕЧАТИ
Русяев А.Ю. 126

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ О ПРОЦЕССАХ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
Рысин Д.О. 130

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПОЛИТИТАНАТА КАЛИЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО МАРГАНЦЕМ И ХРОМОМ
Васильева И.Д., Васильева А.А., Саунина С.И., Третьяченко Е.В., Макаров А.А., Максимова Л.А. 133

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ
ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
Бондарев А.Е., Пашинов А.П. 136

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ ИННОВАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЗАЩИТЫ И УСТОЙЧИВОСТИ
Бондарев А.Е., Пашинов А.П. 139

РАЗРАБОТКА ПОКРЫТИЙ ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ
Бондарев А.Е., Пашинов А.П. 142

ВНЕКЛЕТОЧНЫЙ БИОСИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА
СМЕШАННЫМ МЕТАНОТРОФНЫМ СООБЩЕСТВОМ
Сачавский А.А., Решетова А.С., Виноградова В.Ю. 144

НОВЫЙ ВОЛНОВОДНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКОСТЕЙ
Андреев А.А., Середич С.В., Гукова В.И., Хайрушев И.В. 148

ИССЛЕДОВАНИЕ АЧХ УПРАВЛЯЕМОГО ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩЕГО
ФИЛЬТРА НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ С ПОДВИЖНОЙ
ПЛАСТИНОЙ В Х-ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ
Середич С.В., Андреев А.А., Гукова В.И., Великанов И.С. 151

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАГРУЗКИ ВЕЩЕСТВ
В МИНЕРАЛИЗОВАННЫЙ МИКРОЧАСТИЦАМИ ВАТЕРИТА
КОМПОЗИТНЫЙ МАТЕРИАЛ С МАТРИЦЕЙ ИЗ ПОЛИКАПРОЛАКТОНА
Великанов И.С., Короневский Н.В., Сергеева Б.В. 155

БИОСОВМЕСТИМЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫЕ
МАТЕРИАЛЫ: ПЕРСПЕКТИВЫ В БИОМЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКЕ
Сеченева Е.В., Моргунов Н.Р. 158

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРНУЮ ОРГАНИЗАЦИЮ ДНК
Улыбина Д.В., Кривоногов Л.Ю. 161

ОСНАСТКА ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ
В РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСАХ
Филин В.А. 164

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ КАВИТАЦИОННО-
ДИФФУЗИОННОМ МЕТОДЕ СИНТЕЗА НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА
Филиппов М.В., Шапкин Н.Д. 168

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ МЕДИ С ВЫСОКОЙ АДГЕЗИЕЙ
НА СТАЛЬ: РОЛЬ ЩЕЛОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА
Холодкова А.Г., Абозина М.Н. 171

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПЭКК, СФОРМИРОВАННЫХ
НА TI МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОРАСПЫЛЕНИЯ
Ли Ц., Букал В.Р. 173

СИНТЕЗ ОРГАНИЧЕСКИХ КАРБОНАТОВ ИЗ КАТЕХОЛКАРБОНАТА
И ГЕКСАНОЛА В ПРИСУТСТВИИ ЦЕОЛИТОПОДОБНЫХ
ИМИДАЗОЛАТНЫХ КАРКАСОВ
Цыдыпова А.С., Архипов Д.А., Приходько С.А., Панченко В.Н., Шефер К.И.,
Исаева В.И., Тимофеева М.Н. 177

ПОЛУЧЕНИЕ МУРАВЬИНОЙ КИСЛОТЫ ИЗ УГЛЕВОДНОГО СЫРЬЯ В ПРИСУТСТВИИ НАНЕСЕННЫХ V-СОДЕРЖАЩИХ КАТАЛИЗАТОРОВ
Черенков И.А., Медведева Т.Б., Лукоянов И.А., Панченко В.Н., Тимофеева М.Н., Громов Н.В. 180

СИНТЕЗ СВЧ-МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИРКОНИЯ, ПРОМОТИРОВАННОГО СЕРНОЙ КИСЛОТОЙ, И ИХ ИСПЫТАНИЕ В ПРЕВРАЩЕНИИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ В ЦЕННЫЕ ПРОДУКТЫ
Черепанова К.С., Медведева Т.Б., Жужгов А.В., Громов Н.В. 123

ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА ПОД ВЛИЯНИЕМ ГЕЛЕОБРАЗУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ
Шапкин Н.Д., Филиппов М.В. 185

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА $AlFeNiCoCrNb_{0.25}$
Ковалевская Ж.Г., Лю Ю 190

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ НАГРУЗКИ НА ИМПЛАНТАТ ТИТАНОВОЙ ПЛАСТИНЫ ГОЛЕНИ ДЛЯ ОСТЕОСИНТЕЗА
Бережная А.С. 193

РАСЧЕТ ПОРШНЯ ВОДОРОДНОГО ДВИГАТЕЛЯ
Косынкин М.В. 197

АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НОЖЕЙ
Першин П.М. 200

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РЕЗИНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ: МЕХАНИЗМЫ ДЕГРАДАЦИИ И МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ
Миронов В.А. 204

АНТИГРАВИЙНАЯ БРОНЕПЛЕНКА ДЛЯ АВТОМОБИЛЯ: НАДЕЖНАЯ ЗАЩИТА И СОХРАНЕНИЕ ВНЕШНЕГО ВИДА
Купцов М.А. 208

ВЫБОР СПЛАВА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОРШНЯ ДВС
Кочегаров Д.М. 214

ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИИ ПЛАЗМОНАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ НА ТИТАНЕ
Авдонченкова М.С., Маркелова О.А. 217

ЛАЗЕРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ТИТАНА КАК ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ ПЕРЕД НАНЕСЕНИЕМ БОРИДНОГО СЛОЯ
Телегин С.В. 220

АНАЛИЗ ПЛАЗМОНАПЫЛЕННОГО БИОГЕННОГО TI,CA-ГИДРОКСИАПАТИТА
Моавад М.Х., Викулова М.А., Зотов И.В., Маркелова О.А., Костин К.Б., Пичхидзе С.Я. 223

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БИОСОВМЕСТИМОГО КОМБИНИРОВАННОГО ПОКРЫТИЯ ВНУТРИКОСТНЫХ ЭНДОПРОТЕЗОВ
Курмышова Л.Э., Маркелова О.А., Пичхидзе С.Я. 227

ЗАМЕЩЕНИЕ КАЛЬЦИЯ НА ТИТАН В БИОГИДРОКСИАПАТИТЕ
Маркелова О.А., Викулова М.А., Пичхидзе С.Я. 231

ЭЛЕКТРОЛИЗНОЕ БОРИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ХИРУРГИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ
Глухова С.А., Гоц А.А. 239

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ НА ТОЛЩИНУ ЕЕ ОКСИДНОЙ ПЛЕНКИ
Гостев С.Д. 243

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ФОМИРОВАНИЯ АНОДНОГО МАТЕРИАЛА НА ЕМКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИТАНОВОГО ИОНИСТОРА
Гоц А.А. 245

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЗУБНОГО ТИТАНОВОГО ИМПЛАНТАТА СО ШТОКОМ
Лавров М.В., Щелкунов А.Ю. 247

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦЕМЕНТАЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ
Пустоведов И.А., Войко А.В. 251

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРОЧНЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛИ Х12МФ
Глухова С.А., Гоц А.А. 256

ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИИ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОКРЫТИЯ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ
Рябиничева А.В. 259

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ НАНЕСЕНИИ ПОРИСТЫХ ТИТАНОВЫХ ПОКРЫТИЙ
Фомина М.А., Фомин Г.А. 261

ВЛАДИМИР МАРКОВИЧ ТАРАН: УЧЁНЫЙ, ПЕДАГОГ, АКТИВНЫЙ УЧАСТНИК НАУЧНОЙ ШКОЛЫ В ОБЛАСТИ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 269

ИТОГИ IV ВСЕРОССИЙСКОЙ МОЛОДЕЖНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ»
Фомин А.А. 271

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КРУГЛОСТИ НА КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

Д.А. Александров
Научный руководитель: д.т.н., профессор Захаров О.В.

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва

Аннотация. *Представлены результаты экспериментальных исследований по измерению круглости на координатно-измерительной машине Zeiss PRISMO navigator. Выполнен расчет круглости с использованием четырех базовых окружностей. Установлено, что минимальная оценка круглости соответствует окружностям минимальной зоны.*

Ключевые слова: *измерение, круглость, координатно-измерительная машина*

Значительная часть деталей машиностроения и приборостроения представляют собой тела вращения. Важным показателем геометрических характеристик изделий является круглость. С помощью круглости оценивают допуск формы в поперечном сечении. В зависимости от применяемых приборов и стратегии измерения цилиндричность и радиальное биение часто оценивают по круглости в нескольких сечениях, что рассмотрено в [1-3].

Особенности измерения круглости на КИМ описаны в [4-6]. Среди них можно выделить следующие особенности:

– фиксируют координаты центра щупа в декартовой системе координат КИМ;

– координаты точек на изделии получают после коррекции радиуса щупа;

– щуп имеет большой радиус и выполняет механическую фильтрацию;

– механическое центрирование изделия перед измерением не выполняется;

– измеренные точки имеют неравномерное угловое расположение относительно центра эталонной окружности.

В измерительных приборах применение получили четыре базовые окружности: наименьших квадратов (LSC), минимальной зоны (MZC), минимальной описанной (MCC), максимальной вписанной (MIC). Целесообразность использования каждой из базовых окружностей определяется их практическим приложением [4, 7, 8]. LSC определяется из условия, что сумма квадратов локальных отклонений измеренных точек от построенной окружности минимальна. Декартовы координаты x_1, y_1 центра 0_1 (рис. 1, *а*) рассчитывают на основе минимизации функционала:

$$F_1 = \sum_{i=1}^{n} \left[\sqrt{(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2} - r_1\right]^2,$$

_[√(⟦__⟧ ∧ ⟦__⟧ ^)][√((__)^(__

где x_i, y_i – измеренные декартовы координаты, r_1 – радиус LSC, n – число измеренных точек.

Окружности минимальной зоны – две концентрические окружности, охватывающие измеренные точки снаружи и изнутри и имеющие наименьшую разность их радиусов. Декартовы координаты x_2, y_2 центра 0_2 (рис. 1, *б*) рассчитывают на основе минимизации функционала:

$$F_2 = max\left[\sqrt{(x_i - x_2)^2 + (y_i - y_2)^2}\right] - min\left[\sqrt{(x_i - x_2)^2 + (y_i - y_2)^2}\right].\ _[\sqrt{(}$$

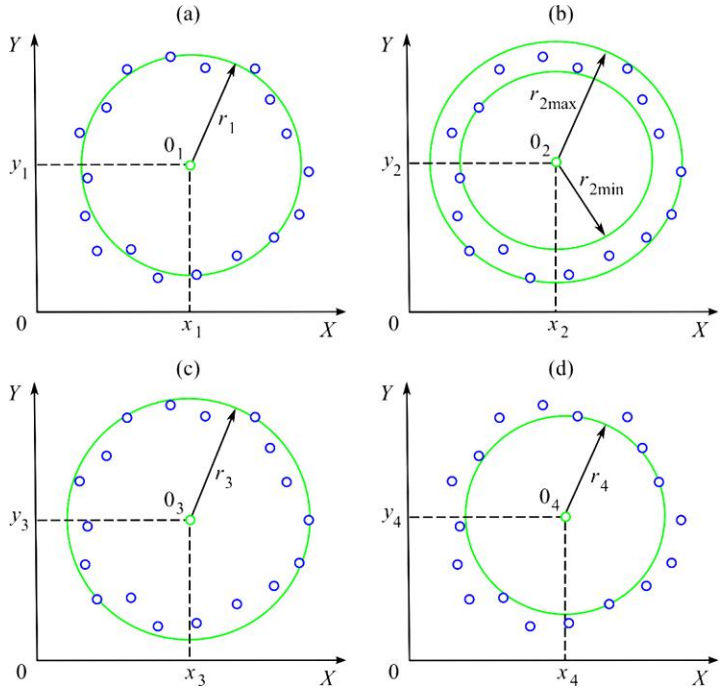


Рис. 1. Базовые окружности: (a) LSC, (b) MZC, (c) MCC, (d) MIC

Минимальная описанная окружность – окружность наименьшего радиуса r_3, которая охватывает снаружи измеренные точки (рис. 1, в). MCC проходит через три или две измеренные точки. Нами предлагается рассчитывать декартовы координаты x_3, y_3 центра 0_3 на основе минимизации функционала:

$$F_3 = max\left[\sqrt{(x_i - x_3)^2 + (y_i - y_3)^2}\right].\ _[\sqrt{(}\ ⟦__⟧ \wedge ⟦__⟧ \wedge)]_____$$

Максимальная вписанная окружность – окружность наибольшего радиуса r_4, которая охватывает изнутри измеренные точки (рис. 1, г). Нами предлагается рассчитывать декартовы координаты x_4, y_4 центра 0_4 на основе минимизации функционала:

$$F_4 = -min\left[\sqrt{(x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2}\right]._D_Dd_____KĎƧƧ_____$$

Проведены экспериментальные исследования на приборе (рис. 2). Пример измерения круглости дан на рис. 3.

Рис. 2. Измерение круглости на Zeiss PRISMO navigator

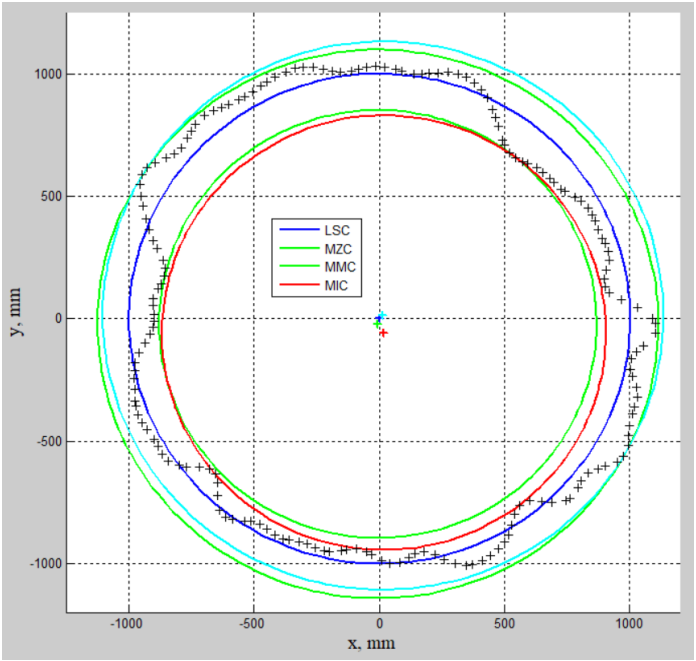


Рис. 3. Результат измерения круглости на Zeiss PRISMO navigator

Анализ результатов показал, что минимальная оценка круглости соответствовала MZC, а наибольшая оценка MCC. Расхождение между оценками круглости составило для MZC и LSC 9,3 %, для LSC и MCC 21,7 %. Поэтому для оценки круглости рекомендуется MZC, которая гарантирует минимальную оценку круглости и ее стандартную неопределенность измерения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кононогов С.А., Лысенко В.Г. Координатная метрология. Москва: АСМС, 2010. 380 с.

2. Выборочный измерительный контроль партий деталей с распределением размера по закону Рэлея / С.Н. Григорьев, П.Н. Емельянов, Д.А. Мастеренко, С.Е. Педь // Измерительная техника. 2022. № 6. С. 28-35.

3. Епифанцев К.В. Исследование процесса калибровки и настройки датчиков кругломера ROUNDTEST RA-120P / К.В. Епифанцев, Н.Ю. Ефремов // Датчики и системы. 2022. № 5 (264). С. 57-61.

4. Захаров О.В. Выбор опорных окружностей при анализе круглости деталей подшипников качения / О.В. Захаров, К.Г. Пугин // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 14-21.

5. Захаров О.В. Применение фильтров серии ISO 16610 для анализа структуры поверхности. Часть 1. Обзор профильных фильтров / О.В. Захаров, А.С. Яковишин, А.В. Жуков // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. № 2 (93). С. 22-37.

6. Исследование возможности применения одновиткового вихретокового датчика для измерения дефектов формы / К.В. Епифанцев, Г.А. Петров, В.Н. Белопухов, О.А. Заякин // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 1. С. 63-76.

7. Дискретный алгоритм на основе кусочно-линейной интерполяции для дискового морфологического фильтра / О.В. Захаров, А.Г. Лаптев, В.Г. Лысенко и др. // Измерительная техника. 2022. № 8. С. 35-40.

8. Захаров О.В. Методические основы гармонического анализа круглограмм / О.В. Захаров, В.В. Погораздов, А.В. Кочетков // Метрология. 2004. № 6. С. 3-10.

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕКУРСОРА НА СВОЙСТВА ДВУХФАЗНЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ФЕРРОНИОБАТА-ТИТАНАТА СВИНЦА И МОДИФИЦИРОВАННОГО ФЕРРИТА НИКЕЛЯ

И.А. Александрова, А.А. Давыдова, И.Г. Шептун, Е.А. Решетникова
Научный руководитель: д.х.н., доцент И.В. Лисневская

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация. *В настоящей работе магнитоэлектрическая (МЭ) композиционная керамика на основе высокоэффективного Fe-содержащего сегнетоэлектрика (100-x) масс.%* $Pb(Fe_{0,5}Nb_{0,5})_{0,935}Ti_{0,065}O_3$ *(PFNPT) +*

x масс.% $Ni_{0,9}Co_{0,1}Cu_{0,1}Fe_{1,9}O_{4-d}$ (NCCF) получена твердофазным способом при температуре спекания 1050 °С. Показано, что на эффективность МЭ преобразования и прочие свойства композитов оказывает существенное влияние способ предварительной обработки прекурсора PFNPT. Максимум МЭ коэффициента (75 мВ/(см·Э)) наблюдается у образцов с x = 50-60, изготовленных из пьезоматериала с добавкой Li_2CO_3. Повышение температуры спекания композитов до 1150 °С приводит к образованию посторонней фазы $Pb_2Nb_2O_7$ со структурой пирохлора и падению МЭ, магнитных и пьезопараметров, что предположительно связано с изменением распределения катионов по подрешеткам A и B структуры шпинели.

Ключевые слова: *мультиферроики; магнитоэлектрические композиты; Fe-содержащие сегнетоэлектрики*

Обогащенные железом сегнетоэлектрики представляют особый интерес в качестве пьезоактивных компонентов МЭ керамики типа пьезоэлектрик – феррит в связи со сходством состава фаз и связанным с этим ожидаемым уменьшением последствий межфазного легирования при высокотемпературном обжиге. На основе высокоэффективного Fe-содержащего сегнетоэлектрика $Pb(Fe_{0,5}Nb_{0,5})_{0,935}Ti_{0,065}O_3$ (PFNPT) твердофазным способом при температуре спекания 1050 °С в настоящей работе получена не содержащая посторонних фаз МЭ композиционная керамика (100-x) масс.% PFNPT + x масс.% $Ni_{0,9}Co_{0,1}Cu_{0,1}Fe_{1,9}O_{4-d}$ (NCCF) (рис. 1, а) с плотностью ~80 % от теоретической. Модифицированный феррит никеля и феррониобат-титанат свинца одного из составов, принадлежащих морфотропной области [1], получали твердофазным способом из оксидов при температуре 900-1000 °С и 900 °С. Для исследования влияния режима предварительной подготовки пьезоэлектрика на свойства МЭ композиционной керамики порошок $Pb(Fe_{0,5}Nb_{0,5})_{0,935}Ti_{0,065}O_3$ подвергали предварительному обжигу при температуре 1050 °С и при температуре 1020 °С с добавкой 1 масс. % карбоната лития, в обоих случаях в течение 3 часов. Полученный после синтеза порошки пьезоэлектрика были использованы для изготовления МЭ композитов 50 масс.% $Pb(Fe_{0,5}Nb_{0,5})_{0,935}Ti_{0,065}O_3$ (PFNPT) + 50 масс.% $Ni_{0,9}Co_{0,1}Cu_{0,1}Fe_{1,9}O_{4-d}$ (NCCF), которые спекали при 1050 °С и 1150 °С в течение 2 часов.

Выяснилось, что на эффективность МЭ преобразования и прочие свойства композитов PFNPT – NCCF оказывает влияние способ предварительной обработки прекурсора PFNPT (таблица): максимум МЭ коэффициента $\Delta E/\Delta H$ = 75 мВ/(см·Э) наблюдается у образцов с x = 50-60, изготовленных из порошка PFNPT с добавкой карбоната лития (прекурсор 3), что в 1,5-2,5 раза больше, чем у образцов без добавки Li_2CO_3, изготовленных на основе порошков PFNPT (прекурсоры 1 и 2 до и после обжига при температуре спекания соответственно), отличающихся средними размерами зерен. Повышение температуры спекания МЭ композитов до 1150 °С (прекурсор 3') приводит к образованию по границам зерен посторонней фазы $Pb_2Nb_2O_7$ со структурой

пирохлора (рис. 1, б). МЭ коэффициент в этом случае не превышает 15 мВ/(см·Э), наблюдается ~3-кратное падение пьезопараметров (пьезомодулей d_{ij}, g_{ij}, таблица, прекурсор 3’), что связано с деградацией пьезофазы, а также их магнитных свойств (намагниченностей M_S, M_R), что предположительно объясняется изменением катионного распределения по подрешеткам A и B структуры шпинели за счет повышения температуры спекания.

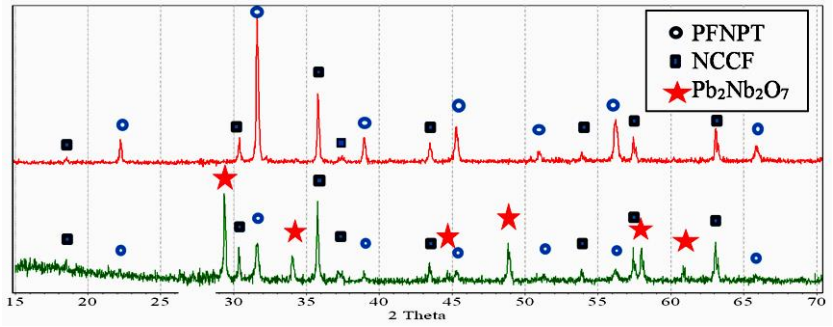


Рис. 1. Порошковые дифрактограммы МЭ композитов (100-x) масс.% PFNPT + x масс.% NCCF, изготовленных на основе PFNPT–прекурсора 3 при температуре 1050 °C (а) и 1150 °C (x = 50, б)

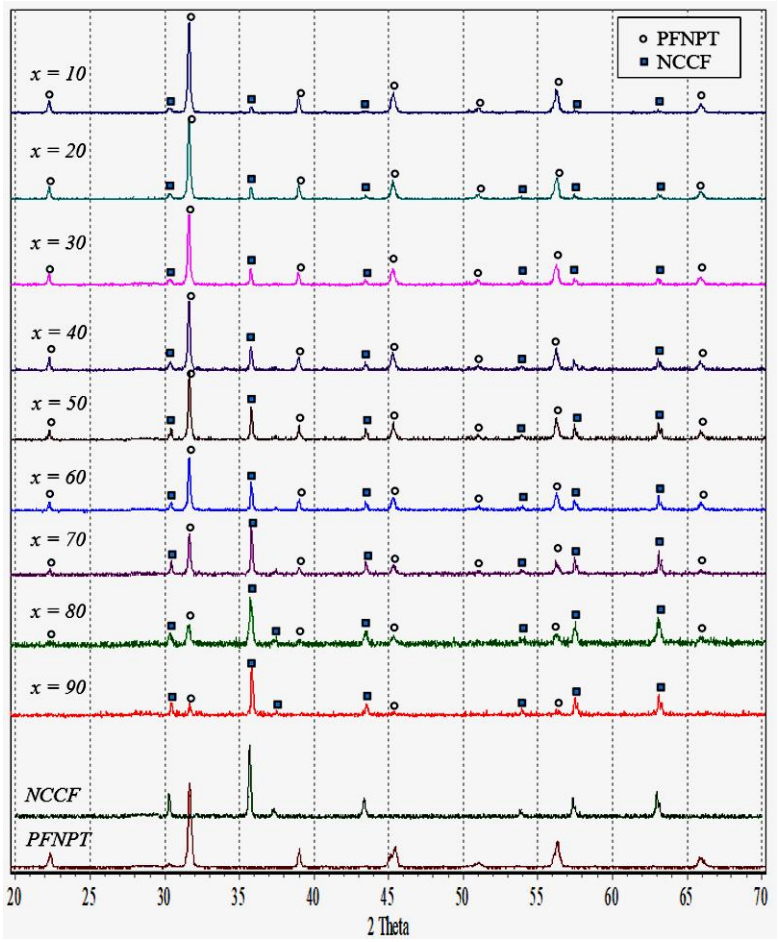


Рис. 2. Порошковые дифрактограммы МЭ композитов (100-x) масс.% PFNPT + x масс.% NCCF

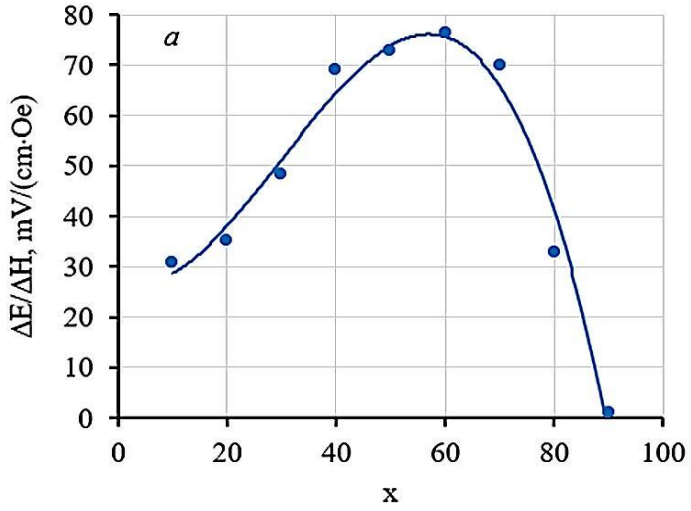


Рис. 3. Концентрационная зависимость коэффициента МЭ преобразования композитов (100-x) масс.% PFNPT + x масс.% NCCF

Свойства МЭ композитов 50 масс.% PFNPT* + 50 масс.% NCCF

PFNPT-прекурсор	P, г/см^3	Lg R	tg δ	$\varepsilon/\varepsilon_0$	K_p	d_{33}, пКл/Н	$-d_{33}$, пКл/Н	g_{33}, мВ·м/Н	$-g_{31}$, мВ·м/Н	M_R, еме/г	M_S, еме/г	Нс, кЭ	ΔE/ΔH, мВ/(см·Э)
1	5,27	9,8	0,20	733	0,057	24	7,4	3,7	1,1	0,66	22	48	29
2	5,41	9,8	0,20	318	0,068	23	7,2	8,0	2,6	0,64	21	43	50
3	5,32	10,7	0,07	234	0,076	21	7,3	10,1	3,5	0,66	20	45	75
3’	5,54	8,9	0,14	237	–	8	–	3,8	–	0,27	8	59	15

**PFNPT-прекурсоры: 1 – после синтеза при 900 °C, 2 и 3 – после прокаливания при 1050 °C без (2) и при 1020 °C с добавкой Li_2CO_3 (3); 3’ – керамика спечена при 1150 °C*

С целью изучения влияния состава композитов на их свойства на основе PFNPT-прекурсора 3 была получена композиционная керамика (100-x) масс.% PFNPT + x масс.% NCCF в широком диапазоне x = 10-90 при температуре 1050 °C. На дифрактограммах (рис. 2) можно видеть, что керамика после спекания не содержит посторонних фаз. Зависимость коэффициента МЭ преобразования ΔE/ΔH от состава композитов (100-x) масс.% PFNPT + x масс.% NCCF (рис. 3) проходит через максимум при x = 60 и достигает 75 мВ/(см·Э), что типично для аналогичных смесевых композитов на основе других высокоэффективных пьезоэлектриков [2-4].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sitalo E.I., Raevski I.P., Lutokhin A.G., Kubrin S.P., Raevskaya S.I., Zakharov Yu.N., Malitskaya M.A., Blazhevich A.V., Zakharchenko I.N. Piezoelectric properties of PbFe1/2Nb1/2O3-PbTiO3 ceramics from the morphotropic

phase boundary compositional range, Ferroelectrics, 419, 76 (2011). https://doi.org/10.1080/00150193.2011.594741

2. Lisnevskaya I.V., Aleksandrova I.A., Savinov A.N. Lead-free multiferroic barium-calcium zirconate-titanate & doped nickel ferrite composites, J. Compos. Sci. 7, 2 (2023). https://doi.org/10.3390/jcs7010002

3. Lisnevskaya I.V. Lead zirconate titanate/modified nickel ferrite magnetoelectric composites prepared from submicron precursors, Inorg. Mater., 54, 1277 (2018). https://doi.org/10.1134/S0020168518120099

4. Lisnevskaya I.V., Aleksandrova I.A., Reshetnikova E.A., Davydova A.A., Sheptun I.G., Raevski I.P., Rusalev Y.V. Fe-enriched two-phase multiferroic composites based on lead ferroniobate – titanate and modified nickel ferrite, Ceram. Int.. 50, 202417613 (2024). https://doi.org/ 10.1016/j.ceramint. 2024.02.250

ПЕРСПЕКТИВЫ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ РОДА *CHLORELLA* КАК ИСТОЧНИКА ЦЕННОГО УГЛЕВОДНОГО СЫРЬЯ

А.О. Беляева, В.В. Болтенков, А.В. Пилигаев
Научный руководитель: к.х.н. Громов Н.В.

Институт катализа им. Борескова СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация. *В статье проведен обзор литературных источников для изучения возможности использования ценных компонентов, извлекаемых из микроводорослей, для производства перспективных экологичных материалов, таких как биодизель, биопластик и муравьиная кислота. Исследовано накопление биомассы для 4 штаммов микроводорослей. Проведена наработка биомассы штамма IC-11 в фотобиореакторе объемом 100 л и определено, что он накапливает в своем составе 26 масс. %.*

Ключевые слова: *микроводоросли, крахмал, углеводное сырье, биомасса, липиды*

Микроводоросли рода *Chlorella* являются перспективным источником широкого спектра продуктов и сырья, таких как углеводы (крахмал), липиды, белки, биологически активные вещества. Они обладают высокой эффективностью фотосинтеза, простотой выращивания и крайне высокой урожайностью продуктов на единицу площади (для липидов – 50 г/м^2) [1]. Многочисленные исследования подтверждают, что использование микроорганизмов, в частности микроводорослей, в качестве сырья для производства высококачественных продуктов и биотоплива является важным направлением для достижения углеродной нейтральности промышленности к 2050 году [2].

Крахмал является одним из самых востребованных компонентов в производстве пищевой продукции. При этом около трети всего мирового производства крахмала используется не в пищевой промышленности, а в других сферах, таких как изготовление каучуков и пластмасс. Биопластик, созданный на основе крахмала, биоразлагаемый, что способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду. Это особенно важно, поскольку традиционные пластики, производимые из невозобновляемого нефтяного сырья, не разлагаются и представляют серьёзную угрозу для природных экосистем [3].

Микроводоросли являются экологичным источником сырья для производства биоразлагаемого термопластичного крахмала благодаря их высокой урожайности, эффективности фотосинтеза, простоте выращивания [1]. К другим преимуществам микроводорослей относятся их видовое разнообразие, способность использовать недорогие питательные вещества для роста, отсутствие конкуренции за землю с сельскохозяйственными культурами [4]. Альтернативным направлением использования крахмала из микроводорослей может стать его переработка в муравьиную кислоту. В исследовательской работе [5] описано получение муравьиной кислоты из биомассы микроводорослей с выходом 49 масс.% в присутствии $H_5PMo_{10}V_2O_{40}$ в качестве катализатора окисления и кислорода воздуха [5].

Другим перспективным применением микроводорослей является использование их в качестве источника липидов для производства биодизеля. На процессы синтеза липидов и углеводов в микроводорослях существенно влияют стрессовые факторы, среди которых ключевыми являются дефицит азота и фосфора, высокая соленость среды, температура, а также изменения режима и интенсивности освещения [2]. Однако стоимость производства биотоплива из микроводорослей по-прежнему остаётся высокой. Снижение затрат возможно за счёт использования недорогих сред для выращивания, включая сточные воды и применению более эффективных штаммов микроводорослей. Комплексный подход к этим направлениям позволит сделать производство биотоплива более экономичным и конкурентоспособным [1].

Целью данной работы было исследование накопления биомассы штаммов микроводорослей рода *Chlorella*, укрупнение процесса наработки биомассы и оценка накопления в выбранном штамме крахмала.

В работе исследованы перспективные штаммы микроводорослей рода *Chlorella*. Проанализированы возможности роста штаммов IC-11, IC-35, IPPAS C-9, IPPAS C-15 в среде BBM, аэрацией потоком газовой смеси воздух:CO_2, со скоростью потока 100 л/ч, с содержанием углекислого газа 2 об.%, при комнатной температуре, под УФ-лампами (мощность 10000 Лм). Установлено, что наибольшая скорость накопления биомассы наблюдается для штамма IC-35.

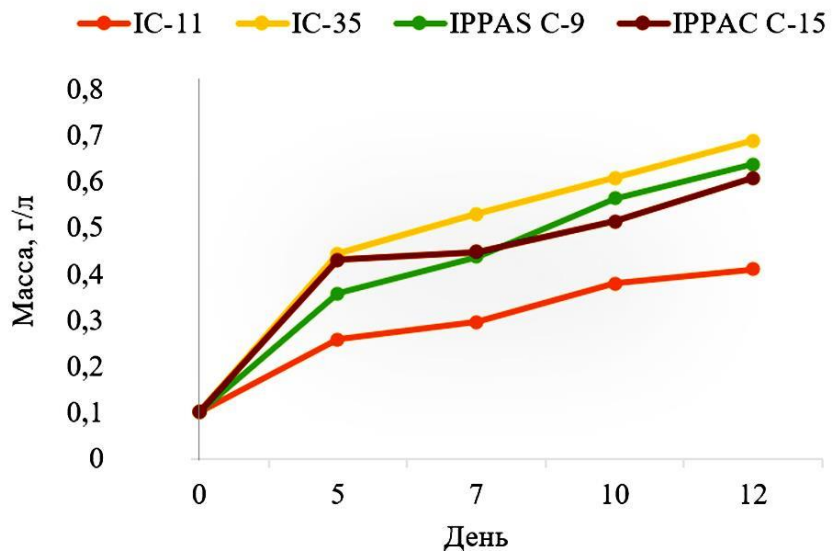


Рис. 1. Прирост биомассы штаммов IC-11, 35, IPPAS C-9, 15

Для штамма IC-11 проводилось испытание с масштабированием метода, в фотобиореакторе объемом 100 л. Результаты прироста биомассы показаны на рис. 2. Установлено, что в фотобиореакторе объемом 100 л штамм IC-11 увеличивает свою биомассу в 12 раз за 15 суток.

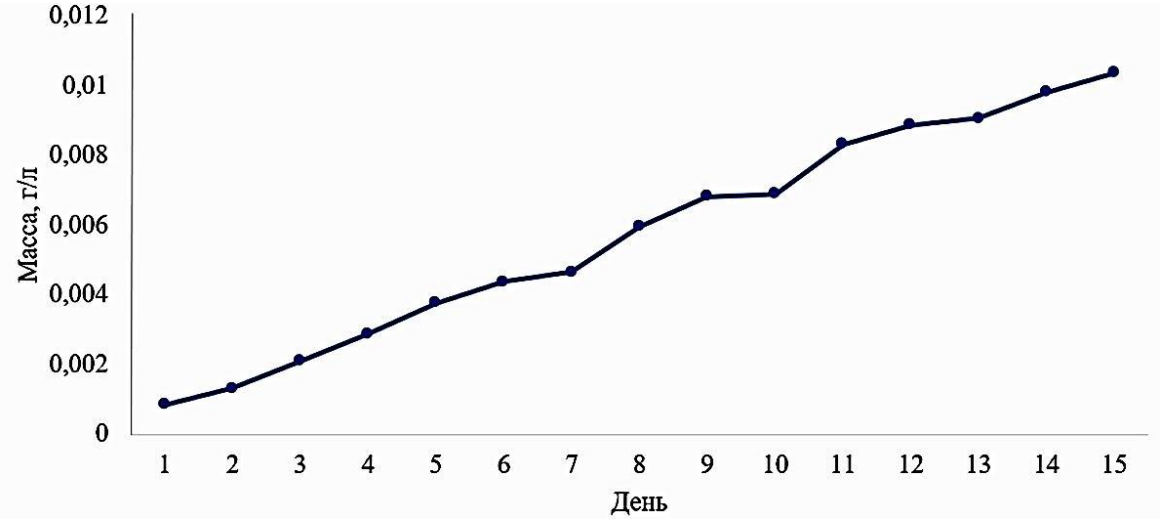


Рис. 2. Прирост биомассы штамма IC-11

Штамм микроводорослей IC-11 анализировались на наличие крахмала спектрофотометрическим методом с использованием антронового реактива. Обнаружено, что микроводоросли IC-11 накапливают в своем составе 26 масс.% крахмала. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности микроводорослей как источника ценных продуктов – крахмала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 25-23-20221.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Extraction of Starch from Marine Microalgae, Chlorella salina: Efficiency and Recovery / P.Y. Wong, Y.H. Lai, S. Puspanadan, R.N. Ramli, V. Lim, C.K. Lee // International Journal of Environmental Research. 2019. Vol. 13. P. 283-293. doi:10.1007/s41742-019-00173-0.

2. Direct Conversion of Microalgae Biomass to Formic Acid under an Air Atmosphere with Soluble and Solid Mo–V–P Heteropoly Acid Catalysts / N.V. Gromov, T.B. Medvedeva, K.N. Sorokina, Y.V. Samoylova, Y.A. Rodikova, V.N. Parmon // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2020. Vol. 8 N. 51 P. 10. doi:10.1021/acssuschemeng.0c06364.

3. Extraction and Characterization of Starch from Microalgae and Comparison with Commercial Corn Starch / R.N. Ramli, C.K. Lee, M.A. Kassim // Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 716. P. 012012. doi: 10.1088/1757-899X/716/1/012012.

4. Microalgae Biorefinery: Optimization of Starch Recovery for Bioplastic Production / F.D. Caprio, S. Amenta, I. Francolini, P. Altimari, F. Pagnanelli // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2023. Vol. 11. № 46. P. 16509-16520. doi:org/10.1021/acssuschemeng.3c04133.

5. Using Microalgae Biomass to Obtain High-value Products, Part One: Biomass Production Methods / K.N. Sorokina, Yu.V. Samoylova & V.N. Parmon // BIOCATALYSIS. 2023. V. 15. P. 69-86. doi: 10.1134/S2070050423010075.

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ НАГРУЗКИ НА ИМПЛАНТАТ ТИТАНОВОЙ ПЛАСТИНЫ ГОЛЕНИ ДЛЯ ОСТЕОСИНТЕЗА

А.С. Бережная
Научный руководитель: д.т.н., с.н.с. Пичхидзе С.Я.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В данной статье проведен анализ ключевых механических свойств титановых сплавов, проведен анализ нагрузки на имплантат коронки зуба.*

Ключевые слова: *имплантат, титан, нагрузка*

Современная травматология и ортопедия предъявляют высокие требования к материалам, используемым для остеосинтеза. Титановые сплавы, благодаря уникальному сочетанию прочности, биосовместимости и коррозионной стойкости, стали золотым стандартом в производстве имплантатов для

фиксации переломов. Особое значение имеет выбор оптимального сплава для пластин остеосинтеза голени, которые подвергаются значительным циклическим нагрузкам в процессе жизнедеятельности пациента [1-8].

Цель работы: определить оптимальный титановый сплав для пластины голени на основе анализа механических характеристик, обеспечить соответствие медицинским требованиям по прочности и гибкости.

Методология: для данного исследования были выбраны следующие сплавы:

1. Ti-6Al-4V (Grade 5)
2. Ti-6Al-7Nb
3. Ti-3Al-2.5V
4. Чистый титан (Grade 4)

Для каждого материала были определены следующие параметры:

• твёрдость (HV): измеряется с помощью твердомера,

• прочность на разрыв (мпа): определяется в результате испытаний на растяжение,

• прочность на изгиб (МПа): оценивается в ходе испытаний на изгиб,

• относительное удлинение (%): измеряется как процентное изменение длины образца до разрушения,

• упругость на изгиб (МПа): оценивается по способности материала восстанавливать свою форму после деформации.

Все испытания проводились в соответствии со стандартами ASTM D638 и ASTM D790. Результаты исследований, иллюстрирующих механические свойства различных титановых сплавов для пластины, приведены на рис. 1.

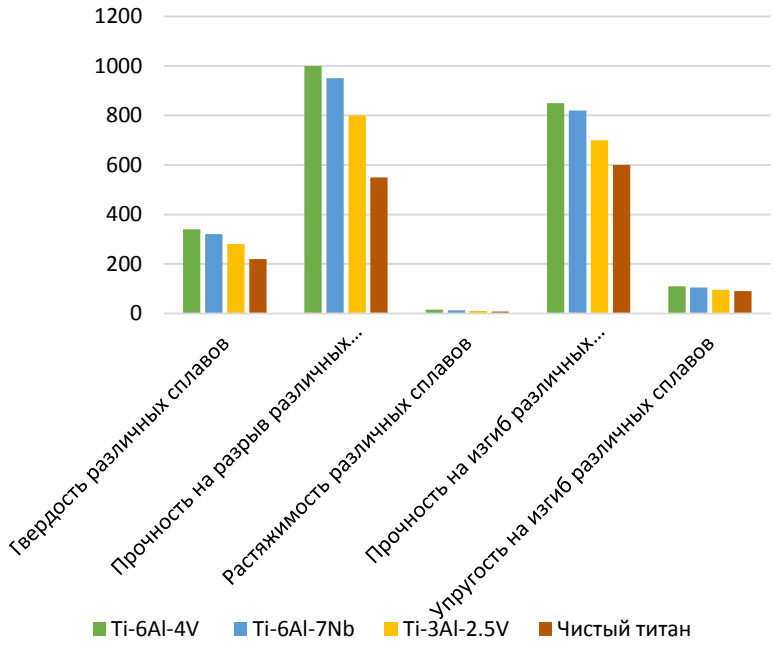


Рис. 1. Механические свойства титановых сплавов [5-8]

Результаты: ниже приведены следующие свойства титановых сплавов:

1. Твёрдость: наибольшая твёрдость у Ti-6Al-4V (340 HV), что обеспечивает устойчивость к деформации.

2. Прочность на разрыв: Ti-6Al-4V (1000 МПа), что указывает на его способность выдерживать значительные нагрузки.

3. Растяжение: Ti-3Al-2.5V: 15 % (наибольшая пластичность)

4. Прочность на изгиб: Ti-6Al-7Nb: 850 МПа.

5. Упругость на изгиб: Ti-6Al-4V (110 ГПа), что указывает на его способность восстанавливать форму после нагрузки.

Исследование механических свойств титановых сплавов показало значительное разнообразие характеристик, что позволяет выбрать материалы в зависимости от конкретных требований к изделию. Наилучшие комплексные характеристики демонстрирует Ti-6Al-4V: высокая твёрдость (340 HV), прочность на разрыв (1000 МПа) и упругость (110 ГПа). Запас прочности конструкции варьируется от 2,5 (при экстремальных нагрузках) до 10 (при стандартных), что соответствует требованиям остеосинтеза. Для исследования взята модель пластины для остеосинтеза голени с размерами 120×15×4 мм (рис. 2). Расчеты проведены в программе Компас-3D.

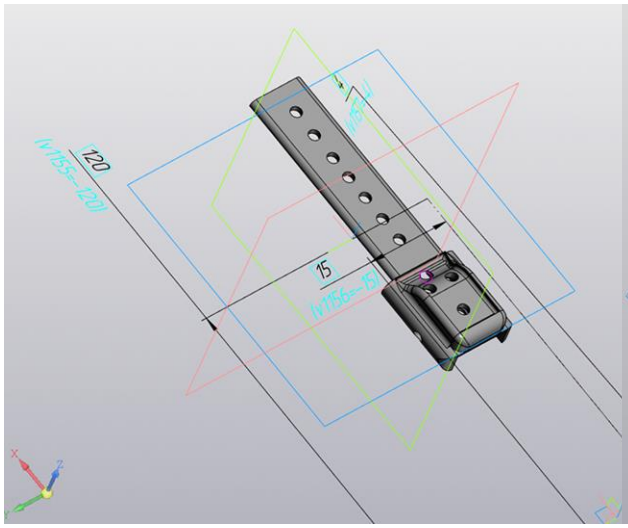


Рис. 2. Модель пластины для остеосинтеза

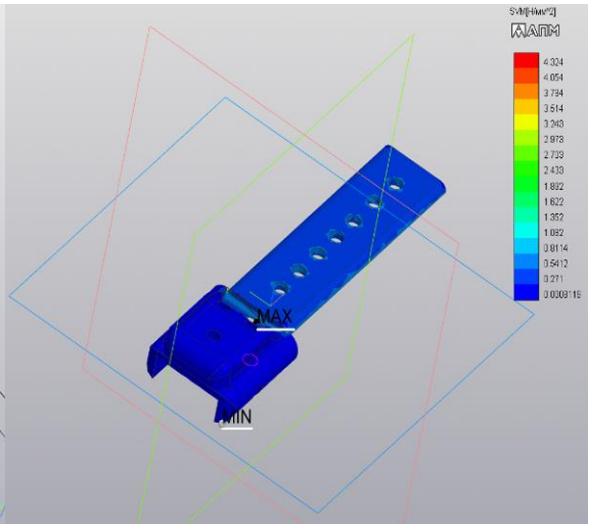


Рис. 3. Результаты расчёта статических напряжений по Мизесу при 1,1 Н/мм²

Наилучшие комплексные характеристики демонстрирует Ti-6Al-4V: высокая твёрдость (340 D), прочность на разрыв (1000 МПа) и упругость (110 ГПа). Запас прочности конструкции варьируется от 2,5 (при экстремальных нагрузках) до 10 (при стандартных), что соответствует требованиям остеосинтеза.

Зависимость максимальных напряжений по Мизесу от приложенных давлений приведена на рис. 6. Видно, что модель пластины для остеосинтеза достаточно прочная.

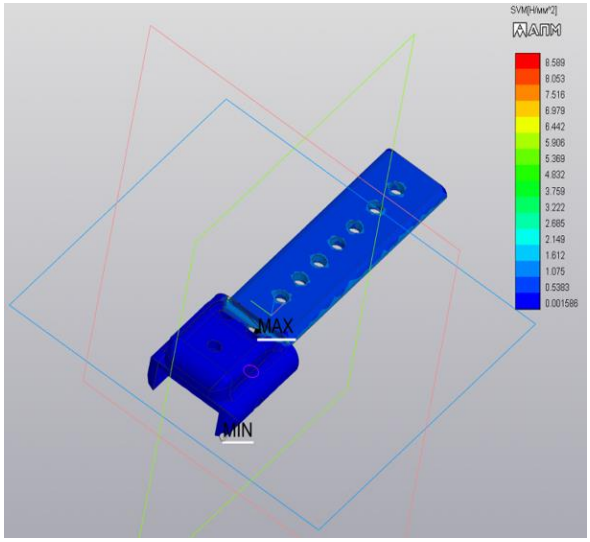


Рис. 4. Результаты расчёта статических напряжений по Мизесу при 2,2 Н/мм²

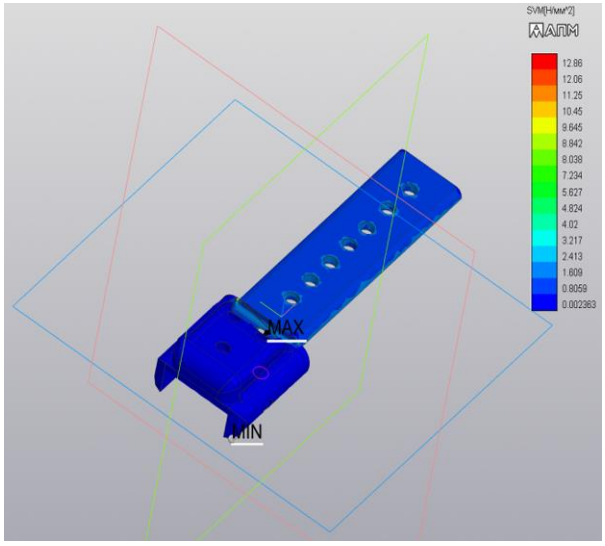


Рис. 5. Результаты расчёта статических напряжений по Мизесу при 3,3 Н/ мм²

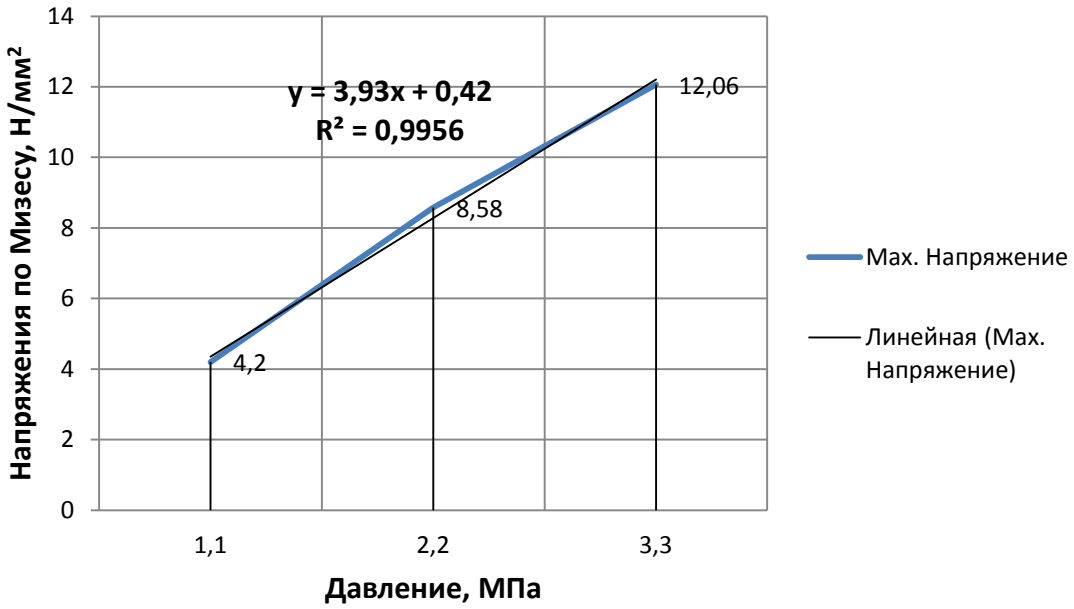


Рис. 6. График зависимости напряжений по Мизесу от приложенного давления

Выводы: 1) подобран титановый сплав для изготовления пластины для голени, а именно Ti-6Al-4V. Сплав показал наибольшие подходящие характеристики при испытаниях; 2) показано, что данная конструкция может выдерживать требуемые напряжения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. https://titanmed.ru/production/plastiny-pri-perelomakh/plastiny-pri-perelome-goleni.html

2. ASTM E8/E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials

3. ASTM E290 Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility.

4. ASTM D2240 Standard Test Method for Rubber Property–Durometer Hardness.

5. http://m.ru.yunchtitanium.com/info/mechanical-properties-of-titanium-and-titanium-46738863.html

6. https://abatmenty.ru/spravochnik/podrobnyj-analiz-titanovyh-splavov-v-rossijskoj-stomatologii

7. https://detalmach.ru/spravka365.html

8. https://alloysintl.com/ru/titanium-alloys-supplier/titanium_3-2-5/

БЕСЦВЕТНОЕ СТЕКЛО В СИСТЕМЕ Bi_2O_3-GeO_2

Т.В. Бермешев, М.П. Бундин, Д.В. Хлыстов

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Аннотация. *Показана возможность получения прозрачных бесцветных стекол в системе Bi_2O_3-GeO_2 медленным охлаждением расплава с печью до его затвердевания, с последующим извлечением на воздух.*

Ключевые слова: *бесцветные стекла, германат висмута, синтез, аморфное состояние*

Известно множество работ, посвященных изучению стеклообразования в системе Bi_2O_3–GeO_2. Однако работ, которые бы рассматривали получение бесцветных прозрачных стекол в ней – крайне мало.

Известны работы, например [1], в которых со ссылкой на предыдущие, более ранние публикации, говорится, что в зависимости от условий получения и химического состава, стекла в системах Bi_2O_3-GeO_2 и Bi_2O_3-SiO_2 могут иметь различную окраску: от светло-желтой (и даже оранжевой) до красно-коричневой и черной. Отмечается, что на глубину окраски будет влиять содержание Bi_2O_3 в стекле и температура варки стекла. И говорится, что стекла получаются более красными с увеличением валентности ионов Bi.

Сам автор работы [1], показывает, что им были получены стекла с цветами от «от светло-желтого до темно-красного» [1] (системы Bi_2O_3-GeO_2 и Bi_2O_3-SiO_2).

Изменение окраски связывается с изменением степени окисления висмута при выдержке расплава. Дольше выдержка – большие ионов Bi с более высокой степенью окисления – больше центров окраски. Отжиг стекол на воздухе – снижает количество центров окраски благодаря вос-

становлению ионов висмута до меньшей степени окисления, и осветляет стекла. Отмечается, что изменение цвета не может быть связано с испарением Bi_2O_3 в расплаве [1].

В работе [2] методом литья на охлажденную подложку с последующим отжигом получали бесцветные стекла. Полного обесцвечивания стекол состава 45:55 (Bi_2O_3:GeO_2 в мол.%) удалось добиться после 87 часов отжига (при объеме стекла ~0,1 $см^3$; температура – 460 °С). Если стекла в порошкообразном состоянии – время отжига для обесцвечивания снижается до 6 часов.

В работе [3] также методом литья на подложку с последующим отжигом получали бесцветные стекла за меньшее время (отжиг: 400 °С, 5 ч). Авторы отмечают, что нанокристаллизация и релаксация стекла позволяет получить обесцвеченные образцы и повысить оптические свойства.

Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре Shimadzu XRD6000, для расшифровки использовалось авторское программное обеспечение – Информационно поисковая система ИПС, использующая эталонные дифрактограммы международных кристаллографических баз данных. Съемка макроструктуры проводилась на стереоскопе Stemi 2000 (Carl Zeiss).

В нашей настоящей работе мы получили прозрачные бесцветные стекла в системе Bi_2O_3-GeO_2 медленным охлаждением расплава с печью до его затвердевания, с последующим извлечением на воздух.

Внешний осмотр образцов (рис. 1) показывает получение прозрачных бесцветных стекол, без видимых невооруженным глазом, либо на малых увеличениях, следов кристаллизации.

Рис. 1. Макросъемка образца, полученного свободным охлаждением с печью до затвердевания расплава, с последующим охлаждением на воздухе (×3,75)

Результаты рентгенофазового анализа (рис. 2), подтверждают получение аморфного материала – «гало» на дифрактограмме.

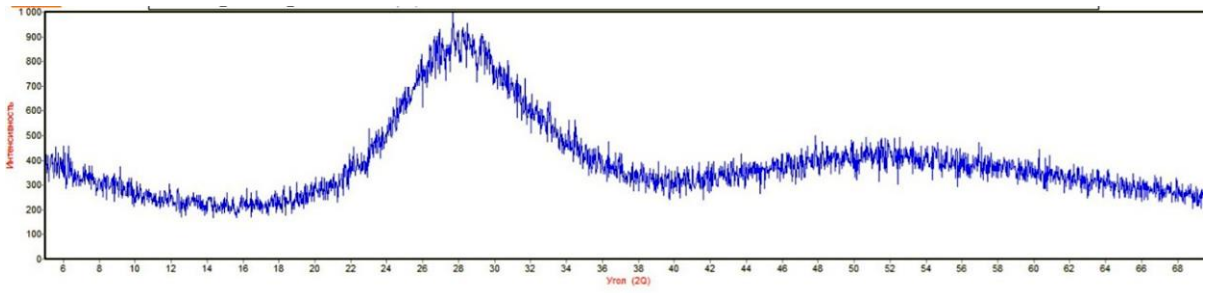


Рис. 2. Дифрактограмма образца, полученного свободным охлаждением с печью до затвердевания расплава, с последующим охлаждением на воздухе

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (код научной темы ФСРЗ-2020-0013).

Отмечено использование оборудования Центра коллективного пользования «Наукоемкие методы исследования и анализа новых материалов, наноматериалов и минерального сырья» ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

Вклад в работу

Бермешев Т.В. – разработка технологии синтеза, написание работы.

Бундин М.П. – проведение экспериментов: плавки, анализ макроструктуры.

Хлыстыв Д.В. – проведение рентгенофазового анализа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ворончихина М.Е. Кристаллизация стекол в системах Bi_2O_3-SiO_2 и Bi_2O_3-GeO_2 / дис. … канд. хим. наук. Москва. Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева. 2010. 171 с.

2. Колобкова Е.М., Слышкина Е.Д., Степанова И.В. и др. Влияние термической обработки на свойства стекол в системе Bi_2O_3-GeO_2 // Успехи в химии и химической технологии. 2017. Т. 31. № 6 (187). С. 113-114.

3. Zh. Shi, Sh. Lv, G. Tang, et al. Multiphase Transition toward Colorless Bismuth–Germanate Scintillating Glass and Fiber for Radiation Detection // CS Appl. Mater. Interfaces. 2020. V. 12. No. 15. P. 17752-17759. https://doi.org/10.1021/acsami.0c02589.

СОЕДИНЕНИЕ $Bi_4Ge_3O_{12}$. СИНТЕЗ. УЛУЧШЕНИЕ

Т.В. Бермешев

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Аннотация. *Кратко рассмотрены основные способы синтеза германата висмута $Bi_4Ge_3O_{12}$ в зависимости от вида материала: монокристаллы, поликристаллы, порошки, керамика, стеклокерамика, композиты, наноматериалы и пленки. Приведены некоторые способы его улучшения и создания на его основе композитных материалов.*

Ключевые слова: *германат висмута, $Bi_4Ge_3O_{12}$, обзор, синтез, улучшение, легирование, композиционные материалы*

Германат висмута $Bi_4Ge_3O_{12}$ с кристаллической структурой эвлитина (КСЭ) обладает целым комплексом полезных свойств: высокая плотность, негигроскопичность, повышенная химическая, термическая и радиационная стойкость, высокий световыход, большая эффективная молекулярная масса, малая радиационная длина и др. Эти свойства делают его уникальным сцинтилляционным материалом [1, 2].

В большинстве случаев $Bi_4Ge_3O_{12}$ применяется в виде монокристалла и сфера его возможных применений крайне обширна. Благодаря высокой радиационной стойкости, его также широко применяют в качестве детектора с антикомптоновской защитой в космических исследованиях и в медицине.

Известны различные области его применения, такие как исследование космоса, медицина, физика высоких энергий, ядерная физика, датчики и приборостроение, изучение атмосферного электричества, геология и БПЛА, энергетика, поиск взрывчатых веществ.

Германат висмута со КСЭ ($Bi_4Ge_3O_{12}$) синтезируют и применяют как в чистом виде, так и с использованием различных легирующих компонентов, а также в составе более сложных материалов. Его получают в виде монокристаллов, монокристаллического волокна, порошков, керамики и стеклокерамики (также получают стекла состава данного соединения), нанолистов, пленок и различных композитов (например, аэрогелей и др.). Однако в большей части применений $Bi_4Ge_3O_{12}$ используется в первую очередь в виде монокристаллов.

Одним из главных методов синтеза монокристаллов $Bi_4Ge_3O_{12}$ является метод Чохральского и его развитие – низкоградиентный метод Чохральского (LTG CZ) [3, 4]. Также известными методами синтеза являются метод плавающей зоны, метод Бриджмена-Стокбаржа и метод микровытягивания.

Порошкообразный $Bi_4Ge_3O_{12}$ получают гидротермальным синтезом, методом соосаждения, (осаждения, химический синтез), механохимическим синтезом, самораспространяющимся высокотемпературным синтезом (СВС), синтезом в расплаве солей.

Порошки и керамику получают также твердофазным синтезом, методом полимерных прекурсоров. Стекло и сктеклокерамику – закалкой и отжигом.

Для получения пленок используется метод дискретного испарения в вакууме и золь-гель синтез. Последним также можно получать порошки. $Bi_4Ge_3O_{12}$ также можно получать методом литья.

Германат висмута со КСЭ ($Bi_4Ge_3O_{12}$) можно улучшать. Легирование является одним из самых простых и известных способов измене-

ния/улучшения свойств материала. Так известны работы, в которых $Bi_4Ge_3O_{12}$ был легирован: Tm, Pr, Er, Ho, Eu, Yb, Sr, Mn, N, V, Nd, Dy, OH−, Mg, Ca, Cl, Ce, Tb. Легирование не всегда приводит к улучшению свойств конечного продукта. Однако именно благодаря ему были получены новые материалы с перспективными свойствами.

Еще одним способом улучшения и создания новых материалов, можно выделить создание различных композитов и гетероструктур, а также наноматериалов.

Например, впервые, возможность получения прозрачных сцинтилляционных композитов на основе аэрогелей SiO_2 с наполнителем $Bi_4Ge_3O_{12}$ была показана в работе [5]. Удельный световыход составляет ~1 % от монокристалла, и совпадает с количеством соединения $Bi_4Ge_3O_{12}$ в аэрогеле. В качестве преимущества полученного материала, авторы указывают малый вес композита, его прозрачность и способность работать до температуры 600 °C.

В работе [6] монокристаллы $Bi_4Ge_3O_{12}$ использовались в качестве подложек для нанокристаллов $CsPbBr_3$ в пленке PMMA (полиметилметакрилат). Получаемые гетероструктуры предлагаются к рассмотрению в качестве быстрого сцинтиллятора, но требуют оптимизации его состава.

Методом моделирования сцинтиллятор $Bi_4Ge_3O_{12}$, покрытый массивом микролинз PMMA, исследован в работе [7]. Практические исследования сцинтиллятора $Bi_4Ge_3O_{12}$, покрытого PMMA показаны в более ранней работе [8]. Образцы были получены с применением мягкой рентгеновской интерференционной литографии и атомно-слоевого осаждения. В результате был получен материал, «улучшение интеграции длины волны и угла выхода» [8] которого: 95,1 %.

Нанолисты $Bi_4Ge_3O_{12}$ «в форме стебля лотоса» [9], вертикально выращивали на никелевой пене с помощью прямого сольвотермального метода в работе [9]. Полученные образцы исследовались в качестве анодных материалов для литий-ионных и натрий ионных батарей. Обратимая емкость образцов составила 1033,1 мАч/г для первого цикла, с сохранением емкости 709 мАч/г после 88 циклов (при 0,10 А/г, 0,01~3,0 В). Для натрий-ионных: сохранял емкость 332,3 мАч/г после 100 циклов (при 0,10 А/г) [9].

Композитный полимерный сцинтиллятор с наночастицами HfO_2 получали в работе [10]. Его нанокомпозитные пленки чередовали с листами $Bi_4Ge_3O_{12}$ для получения многослойного гетероструктурного сцинтиллятора, обладающего временным разрешением 115 пс (511 кэВ) [10].

В работе [11] в рамках создания фотонного кристалла и улучшения свойств, на поверхность $Bi_4Ge_3O_{12}$ наносили массив монослойных наносфер SiO_2, модифицированным методом самосборки. Полученный материал, при определенных условиях (для SiO_2 диаметром 360 нм, при пиковой эмиссии 480 нм), показывает коэффициент усиления светоотдачи до

145,3 % по сравнению с обычным эталонным $Bi_4Ge_3O_{12}$. Авторы отмечают, что полученные в работе материалы, с использованием наносфер SiO_2, весьма перспективны для обнаружения частиц (исследования космоса, ядерная физика).

Выводы

Кратко показаны основные способы синтеза соединения $Bi_4Ge_3O_{12}$ в зависимости от вида материала: монокристаллы, поликристаллы, порошки, керамика, стеклокерамика, композиты, наноматериалы и пленки. Приведены некоторые способы улучшения $Bi_4Ge_3O_{12}$: легирование, нанесение покрытий, создание на его основе различных композиционных материалов, наноматериалов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (код научной темы ФСРЗ-2020-0013).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бермешев Т.В., Жереб В.П., Бундин М.П. и др. Особенности затвердевания расплава $2Bi_2O_3 \cdot 3GeO_2$ при различных условиях охлаждения // Неорганические материалы. 2022. Т. 58 № 4. С. 451-463. DOI: 10.31857/S0002337X22040029.

2. The design and performance of the XL-Calibur anticoincidence shield / Iyer N.K., Kiss M., Pearce M. at al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. V. 1048. 2023. 167975. https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167975.

3. Теплопроводность, теплоемкость и термодинамические функции монокристалла $Bi_4Ge_3O_{12}$ / П.А. Попов Н.В. , Моисеев, В.Н. Шлегель и др. // Физика твердого тела, 2010, том 52, вып. 9. С. 1729-1731.

4. Recent progress in oxide scintillation crystals development by low-thermal gradient Czochralski technique for particle physics experiments / V.N. Shlegel, Yu.A. Borovlev, D.N. Grigoriev, et al. // International Conference on Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR17). Journal of Instrumentation. 2017. V. 12. C08011. DOI 10.1088/1748-0221/12/08/C08011.

5. Scintillation Material Based on SiO2 Aerogel Containing Highly Dispersed $Bi_4Ge_3O_{12}$ / V.O. Veselova, O.M. Gajtko N.A. , Sipyagina, et al. // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2022. V. 67. № 11. P. 1861-1867. DOI: 10.1134/S003602362260068X.

6. Scintillation material based on heterostructures of nanocrystals $CsPbBr_3$ in PMMA / Skrypnyk T., Bespalova I., Viagin O., et al. // 2022 IEEE 12th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP). 2022. INSPEC Accession Number: 22242103. DOI: 10.1109/NAP55339.2022.9934125.

7. Light extraction enhancement and directional control of scintillator by Chen X., Liu B., Zhu J., et al. using microlens arrays. Opt. Express. V. 26. 2018. P. 23132-23141. https://doi.org /10.1364/OE.26.023132.

8. Enhanced light extraction of scintillator using large-area photonic crystal structures fabricated by soft-X-ray interference lithography / Zhu Zh., Wu Sh., Xue Ch., et al. // Applied physics letters. 2015. V. 106. 241901. https://doi.org/10.1063/1.4922699.

9. Lotus-stalk $Bi_4Ge_3O_{12}$ as binder-free anode for lithium and sodium ion batteries / Xu J., Wei W., Zhang X., et al. // Chinese Chemical Letters. 2019. V. 30. P. 1341-1345. https://doi.org/10.1016/j.cclet.2019.03.005.

10. Highly luminous scintillating nanocomposites enable ultrafast time coincidence resolution for γ-rays detection with heterostructured multilayer scintillators / Sala M., Orfano M., Secchi V., et al. // Adv.Funct.Mater. 2024. P. 2421434. https://doi.org/10.1002/adfm.202421434.

11. Liu Y., Liu F., Tang W., et al. Light extraction enhancement of BGO scintillator by monolayers of SiO_2 periodic array // AIP Advances. 2019. V. 9. 105217. https://doi.org/10.1063/1.5124361.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ВНУТРЕННИМ ПРОТЕКТОРОМ

Д.Е. Бижанов, Д.В. Ромашев
Научный руководитель: к.т.н., доцент Хорин А.В.

Пензенский государственный университет, г. Пенза

Аннотация. *В данной работе приводятся отрасли, в которых использование слоистых металлических материалов с внутренним протектором (СММ с ВП) выигрышно по сравнению с традиционными материалами – нержавеющими сталями, а также указываются конкретные преимущества новых материалов.*

Ключевые слова: *коррозионностойкие материалы, нержавеющая сталь, углеродистая сталь, конструкционные материалы*

Нержавеющая сталь является стратегическим ресурсом, находящим применение в большинстве отраслей промышленности, однако в определенных условиях ее использование связано с осложнениями, которых можно избежать благодаря СММ с ВП.

Данные материалы представляют собой композит, состоящий из чередующихся слоев нержавеющей и углеродистой стали, которые образуют между собой гальванические пары и трансформируют процессы коррозии при переходе между слоями [1]. Листовой полуфабрикат из СММ с ВП це-

лесообразно получать сваркой взрывом, после чего при необходимости можно получать детали обработкой давлением и собирать их в конструкции сваркой взрывом [2].

СММ с ВП обладают двумя ключевыми преимуществами по сравнению с гомогенной нержавеющей сталью. Первое из них – многократное (до 23 раз) повышение коррозионной стойкости [3]. Несмотря на то, что в нормальных условиях гомогенная нержавеющая сталь (например, 12Х18Н10Т) устойчива к поверхностной и межкристаллитной коррозии, в химически активной среде она подвергается питтинговой коррозии [4], при которой в материале образуются сквозные каналы диаметром 350-500 мкм, нарушающие герметичность конструкции и резко снижающие ее прочность. Такое явление встречается главным образом в нефтегазовой промышленности, где нефть во вновь разрабатываемых месторождениях содержит значительное количество сероводорода и углекислоты; в химической промышленности, где используется широчайший спектр активных реагентов; в атомной промышленности, где побочным продуктом работы реакторов является большое количество ионизированных отходов. Применение СММ с ВП позволит увеличить устойчивость оборудования к питтинговой коррозии, что продлит срок его службы, повысит надежность [5] и сократит издержки по его замене.

Второе преимущество СММ с ВП – снижение стоимости толстолистовых материалов. Обеспечение коррозионной стойкости целиком производится плакирующим слоем толщиной 6-10 мм, остающийся же слой материала можно заменить углеродистой сталью, стоимость которой может быть ниже, чем у нержавеющей, в 10 и более раз.

Благодаря этому, даже с учетом стоимости производства композита сваркой взрывом, при толщине листа от 15 мм можно добиться экономии средств уже на этапе закупки полуфабрикатов. Это актуально как в упомянутых ранее отраслях, так и в энергетике, так и пищевой промышленности, энергетике, судостроении, где применяются массивные аппараты и конструкции и экономический эффект от их изготовления из СММ с ВП будет колоссален. Таким образом, существуют разнообразные ниши, в которых использование СММ с ВП рационально и выигрышно.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Эксплуатационные характеристики коррозионностойких слоистых металлических материалов с внутренним протектором / А.Е. Розен, А.В. Хорин, О.Н. Логинов [и др.] // Новые материалы: перспективные технологии получения и методы исследования: сборник тезисов докладов 20-й Международной школы-конференции имени Б.А. Калина для молодых ученых и специалистов, Москва, 14-16 ноября 2022 года. Москва: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2022. С. 207-210.

2. Бижанов Д.Е., Хорин А.В. Производство бесшовных и шовных труб из корозионностойких материалов с внутренним протектором для атомной, химической и нефтегазодобывающей промышленности // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте: сборник статей XI Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов с международным участием. Пенза, 16-17 марта 2023 года. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. С. 57-62.

3. Применение сварки взрывом для производства инновационных композитных материалов / Д.Е. Бижанов, А.В. Хорин, В.М. Батрашов, А.Е. Розен // Современные технологии, материалы и техника: сборник научных статей 2-й Всероссийской научно-технической конференции. Воронеж, 20 декабря 2024 года. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2024. С. 39-43.

4. Леонтьев К.А., Крепышева И.В. Питтинговая коррозия железа. Способы защиты от коррозии // Молодежная наука в развитии регионов. 2022. Т. 1. С. 159-160.

5. Реформатская И.И., Подобаев А.Н. Стойкость против питтинговой коррозии как критерий безопасности эксплуатации металлического оборудования // Безопасность труда в промышленности. 2024. № 4. С. 51-55.

ПРОИЗВОДСТВО КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

Д.Е. Бижанов, Д.В. Ромашев
Научный руководитель: к.т.н., доцент Хорин А.В.

Пензенский государственный университет, г. Пенза

Аннотация. *В данной работе обоснован выбор сварки взрывом (СВ) как основного метода производства коррозионностойких композитных материалов, а также описана технология ее проведения.*

Ключевые слова: *коррозионностойкие материалы, нержавеющая сталь, углеродистая сталь, сварка взрывом*

В современной науке и технике актуальна разработка композитных материалов, по тем или иным свойствам превосходящих традиционные. Одни из таких решений является слоистый металлический материал с внутренним протектором, представляющий собой чередующиеся слои нержавеющей и углеродистой стали и обеспечивающий повышенную коррозионную стойкость по сравнению с традиционной нержавеющей сталью

[1]. При массовом внедрении такого материала важнейшей задачей становится соединение слоев между собой надежным и производительным способом.

Наиболее распространенными способами производства биметаллов, которые можно было бы применить для слоистых металлических материалов с внутренним протектором, являются наплавка и горячая прокатка. Однако первый процесс имеет низкую производительность, второй значительно осложняется при увеличении толщины соединяемых слоев, и ни один процесс не обеспечивают высокую надежность соединения слоев из-за низкой адгезии [2]. Наиболее перспективным является применение сварки взрывом, которая обеспечивает высокое качество соединения, имеет высокую производительность и позволяет соединять более двух слоев за один подрыв.

Данная технология относится к механическим способам сварки, так как соединение деталей происходит за счет сближения поверхностей на расстояние образования межатомных связей без их расплавления. Для проведения СВ используются листовые заготовки, соединяемые поверхности которых зачищают от загрязнения и пленок [3]. После этого заготовки устанавливают параллельно одну поверх другой: наиболее массивная находится внизу сборки на песчаной или земляной насыпи, остальные располагаются в порядке, предусмотренном готовым материалом. Промежутки между пластинами рассчитываются заранее и выставляются за счет жеребеек – небольших пластинок из материала, однородного одному из соединяемых. На верхний лист устанавливается контейнер с сыпучей взрывчаткой, чей состав и высота насыпа также рассчитываются заранее [3]. Детонатор устанавливается в углу короба либо на специальном выступе, вынесенном за пределы соединяемых листов.

При активации детонатора по объему взрывчатки проходит детонационная волна, которая разгоняет верхние пластины, что обеспечивает их соударение с нижними на высокой скорости и образование межатомных связей [4].

При этом скорость распространения взрывной волны хоть и высока, но ограничена, из-за чего соединяемые листы ударяются не всей поверхностью одновременно, а по круговому фронту, распространяющемуся от точки начала детонации.

В процессе метания листы подвергаются двойному перегибу, из-за чего соединяемые сваркой взрывом материалы должны обладать относительным удлинением не менее 8 % во избежание их разрушения. Вытесняемый из промежутка между листами воздух превращается в ударно-сжатый газ, с большой скоростью движущийся перед фронтом соударения и дополнительно очищающий соединяемые поверхности от остаточных загрязнений.

После проведения сварки взрывом у полученной заготовки обрезаются края, так как они имеют высокую склонность к браку соединения, и заготовка подвергается рекристаллизационному отжигу, так как в процессе сварки взрывом материал подвергается колоссальному наклепу [5], который необходимо устранить перед дальнейшей механической обработкой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Эксплуатационные характеристики коррозионностойких слоистых металлических материалов с внутренним протектором / А.Е. Розен, А.В. Хорин, О.Н. Логинов [и др.] // Новые материалы: перспективные технологии получения и методы исследования: сборник тезисов докладов 20-й Международной школы-конференции имени Б.А. Калина для молодых ученых и специалистов, Москва, 14-16 ноября 2022 года. Москва: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2022. С. 207-210.

2. Бижанов Д.Е. Производство бесшовных и шовных труб из коррозионностойких материалов с внутренним протектором для атомной, химической и нефтегазодобывающей промышленности / Д.Е. Бижанов, А.В. Хорин // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте: Сборник статей XI Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов с международным участием, Пенза, 16-17 марта 2023 года. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. С. 57-62.

3. Охотников А.А., Федяшов А.С., Хорин А.В. Расчет параметров сварки взрывом для получения восьмислойного композиционного материала системы 12Х18Н10Т – 09Г2С // Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки: Сборник научных трудов по материалам III Всероссийской молодежной конференции, Саратов, 22-23 мая 2024 года. Саратов: Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., 2024. С. 184-188.

4. Применение сварки взрывом для производства инновационных композитных материалов / Д.Е. Бижанов, А.В. Хорин, В.М. Батрашов, А.Е. Розен // Современные технологии, материалы и техника: сборник научных статей 2-й Всероссийской научно-технической конференции. Воронеж, 20 декабря 2024 года. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2024. С. 39-43.

5. Пеев А.П., Кузьмин С.В., Лысак В.И. О распределении энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию металла, при сварке взрывом // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвузовский сборник научных трудов. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2002. С. 22-30.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ КРЕМНИЕВОЙ *N-I-P* НАНОСТРУКТУРЫ

В.С. Володин, Г.Д. Дреев
Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор Богатов Н.М.

Кубанский государственный университет, г. Краснодар

Аннотация. *В статье представлены результаты моделирования внутреннего электрического поля кремниевых наноструктур с высокоомной базой. Показано, что напряженность равновесного электрического поля в высокоомной базе практически постоянна, возрастает с уменьшением размера базы и достигает значение, превышающее* $1{,}6 \cdot 10^7$ *В/м.*

Ключевые слова: *кремний, наноструктура, внутреннее электрическое поле*

Развитие современной электроники идет в направлении уменьшения размеров полупроводниковых структур и, соответственно, увеличения их числа в матрице кристалла. Этот процесс ограничивают физические явления: квантовые размерные эффекты, высокие электрические поля, необходимость теплоотвода вследствие рассеяния энергии. Наноразмерные полупроводниковые структуры обладают особенностями, обусловленными распределением примесей и влиянием поверхности.

Цель работы – моделирование внутреннего электрического поля в кремниевой наноструктуре с неоднородным распределением доноров и акцепторов.

Условная схема моделируемой структуры показана на рис. 1.

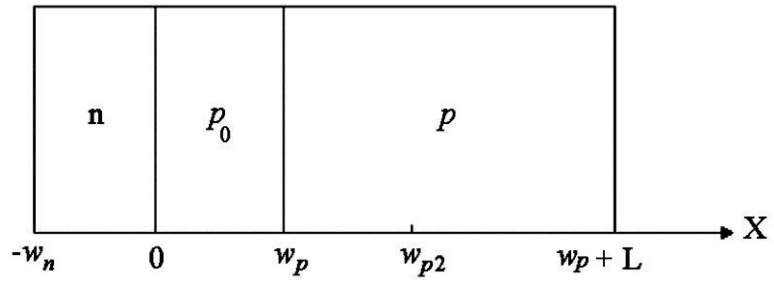


Рис. 1. Схема n-p_0-p структуры

Область n-типа, созданная диффузией атомов фосфора в базу, расположена при $-w_n \le x < 0$. Высокоомная база расположена при $0 \le x < w_p$. База формируется осаждением на подложку p-типа толщиной $L >> w_p$, из которой происходит диффузия бора в базу. Толщина диффузионного слоя акцепторов $\Delta w_p = w_{p2} - w_p$. Анализ изменения внутреннего электрического поля выполнялся с помощью модели [1], основанной на численном реше-

нии уравнения Пуассона, учитывающей влияние поверхностных состояний на свободной поверхности $x = -w_n$.

Рассмотрим результаты моделирования кремниевой структуры с наноразмерными слоями n-p_0-p при температуре 300 К. Концентрация фосфора на поверхности $N_P(-w_n) = 10^{26}$ м$^{-3}$, бора в базе $N_B = 10^{17}$ м$^{-3}$, бора в подложке $N_B(x \geq w_{p2}) = 10^{26}$ м$^{-3}$. Структура № 1: $w_n = w_p = \Delta w_p = 100$ нм; структура № 2: $w_n = w_p = \Delta w_p = 50$ нм; структура № 3: $w_n = w_p = \Delta w_p = 25$ нм.

На рис. 2 показано изменение потенциала электрического поля $\varphi(x)$. Существование максимума потенциала $\varphi(x)$ обусловлено отрицательно заряженными поверхностными состояниями.

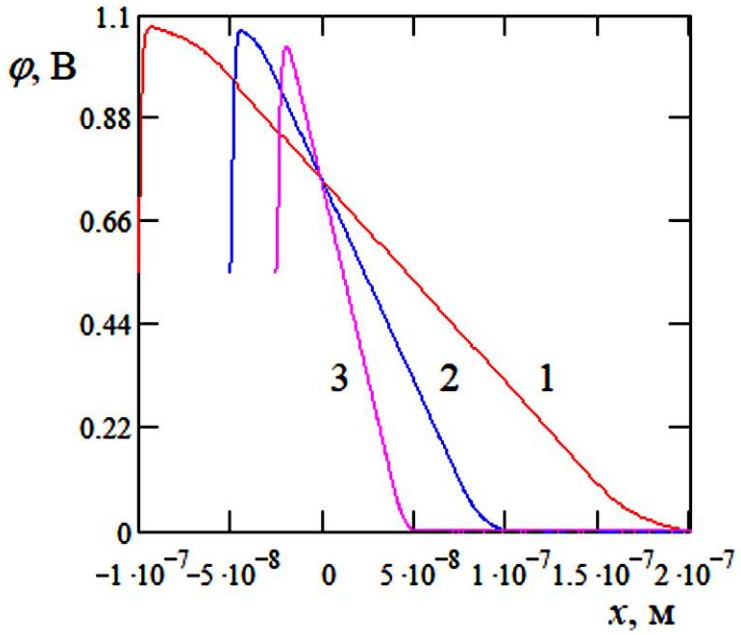


Рис. 2. Распределение $\varphi(x)$ в структурах № 1, № 2, № 3

В структуре № 3 с глубиной n-p_0 перехода $w_n = 25$ нм область пространственного заряда (ОПЗ) перехода сливается с ОПЗ поверхности.

На рис. 3, рис. 4 показано изменение напряженности электрического поля $E(x)$ в различных масштабах.

Поверхностная область создает потенциальный барьер треугольной формы для транспорта носителей заряда с основанием $a \approx 6$ нм, высотой $h \approx E_g/2$ (E_g – ширина запрещенной зоны).

Вектор напряженности электрического поля в этой области противоположен вектору напряженности в базе, превышает по модулю $2 \cdot 10^8$ В/м и увеличивает эффективную скорость поверхностной рекомбинации [2]. Пассивация поверхности пленкой диэлектрика позволяет существенно снизить высоту и ширину этого барьера, а также эффективную скорость рекомбинации через поверхностные состояния.

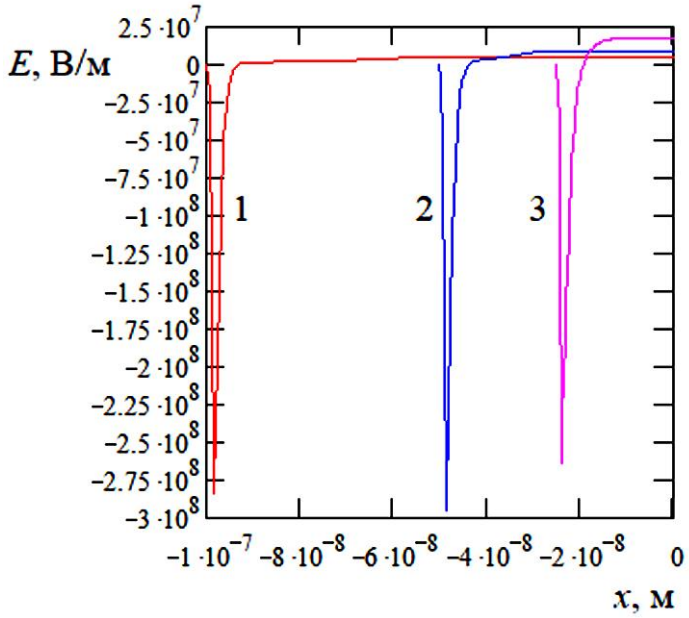


Рис. 3. Изменение $E(x)$ в поверхностной области в структурах № 1, № 2, № 3

Напряженность электрического поля в высокоомной базе (рис. 4) практически постоянна, возрастает с уменьшением размера базы w_p и достигает значения $E_{max} > 1{,}6 \cdot 10^7$ В/м при $w_p = 25$ нм.

В таком электрическом поле происходит разогрев неравновесных носителей заряда, наблюдается нелинейная зависимость их дрейфовой скорости от напряженности электрического поля, пролетный режим транспорта, ударная ионизация и другие нелинейные эффекты [3, 4].

Таким образом, результаты моделирования демонстрируют дополнительные возможности управления внутренним электрическим полем и свойствами полупроводниковых наноструктур.

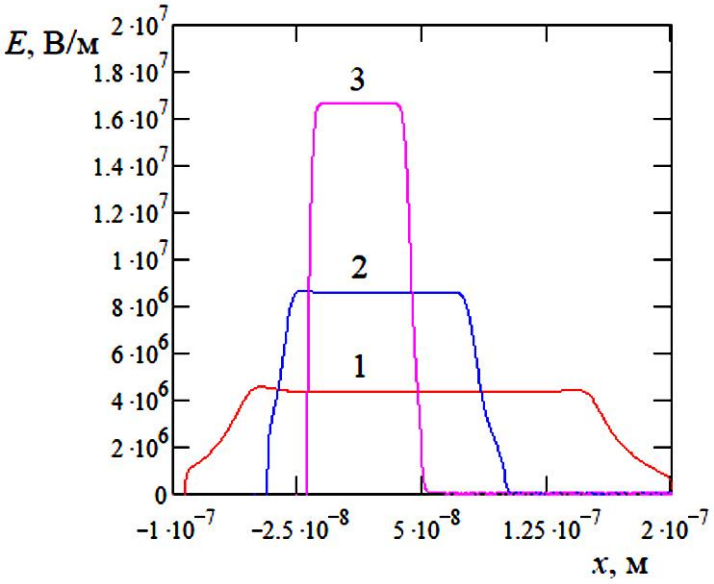


Рис. 4. Изменение $E(x)$ в n-p_0-p структурах № 1, № 2, № 3

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Богатов Н.М. Численное решение уравнения Пуассона в *n-p* переходе с учетом поверхностных состояний // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2024. Т. 21. № 3. С. 61-69.

2. Влияние поверхностных состояний на электрическое поле *n-p* перехода / Н.М. Богатов, В.С. Володин, Л.Р. Григорьян, М.С. Коваленко // Известия ЮФУ. Технические науки. 2024. № 3. С. 266-275.

3. Гуртов В.А. Твердотельная электроника. Москва: Техносфера, 2008. 512 с.

4. Берикашвили В.Ш., Воробьев С.А. Твердотельная электроника и микроэлектроника. Москва: КноРус, 2023. 301 с.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДИСКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Вай Ян Лин
Научный руководитель: Захаров О.В.

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва

Аннотация. *Представлена методика компьютерного моделирования формообразования винтовых поверхностей дисковым инструментом. В основе методики лежит численный метод формообразования. Разработана программа в среде MATLAB с графической поддержкой расчетов. Приведен пример расчета винтовой поверхности инструментом с коническо-торовой поверхностью.*

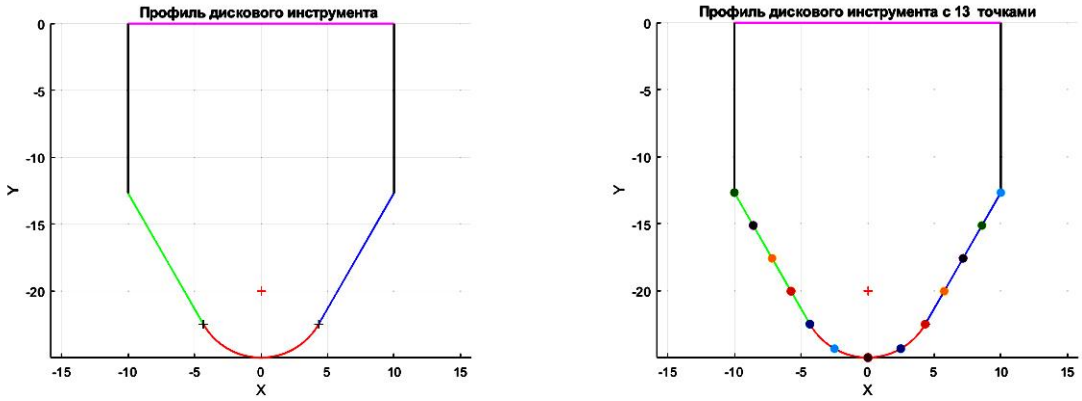
Ключевые слова: *винтовая поверхность, дисковый инструмент, компьютерное моделирование, численный метод*

Винтовые канавки служат основным элементом различных концевых инструментов (фрез, сверл, метчиков). Обработка винтовой канавки требует геометро-кинематических расчетов как профиля инструмента, так и наладки станка. В настоящее время для черновой обработки наиболее часто используют дисковые фрезы. Как правило, рабочую поверхность фрезы выбирают простой: в виде цилиндра, конуса, тора или их сочетаний.

Задачу можно решать методами дифференциальной геометрии, численными методами, с помощью известных программ [1-4]. Численный метод профилирования рассмотрен в работах [5-7]. Показано, что такой метод не накладывает ограничений на сложность профиля (учитывает точки излома профиля), но при этом погрешность расчета зависит от принятых

параметров и заранее не может быть оценена. В настоящей статье представлен доработанный численный метод формообразования с компьютерной поддержкой. Общая методика моделирования формообразования включает в себя следующие этапы.

Этап 1. Задание профиля дискового инструмента. Исходные данные: расстояние между центром и центром дуги D, радиус скругления r, угол профиля α, ширина инструмента, L = 20; максимальный радиус инструмента R. В примере (рис. 1, а) представлены следующие значения: D = 20 мм, r = 5 мм, α = 60°, L = 20 мм, R = 25 мм.



а б

Рис. 1. Профиль дискового инструмента

Этап 2. Моделирование профиля инструмента с использованием дискретных точек. Аналитически заданный профиль инструмента представляется набором дискретных данных (точек).

Число точек изменяется в зависимости от требуемой точности расчета. Пример дан на рис. 1, б. Далее инструмент представляется набором круговых линий (рис. 2).

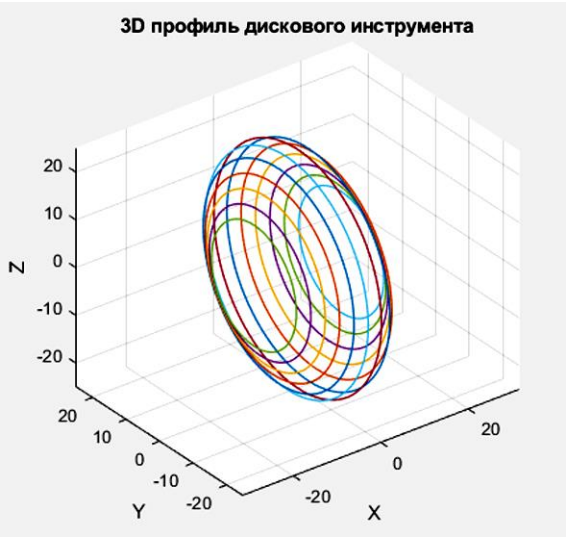
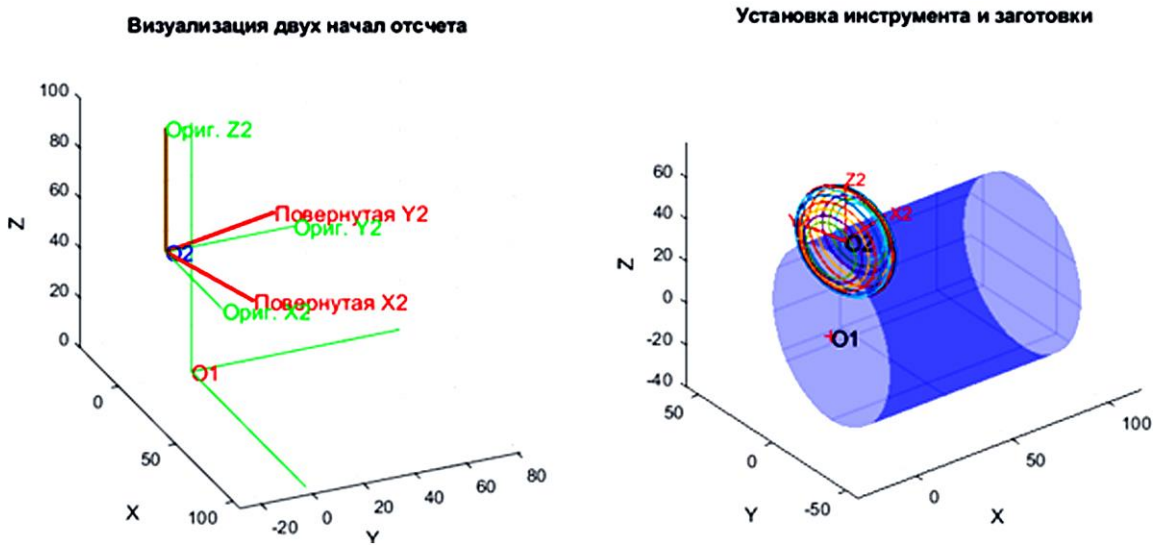


Рис. 2. Моделирование инструмента

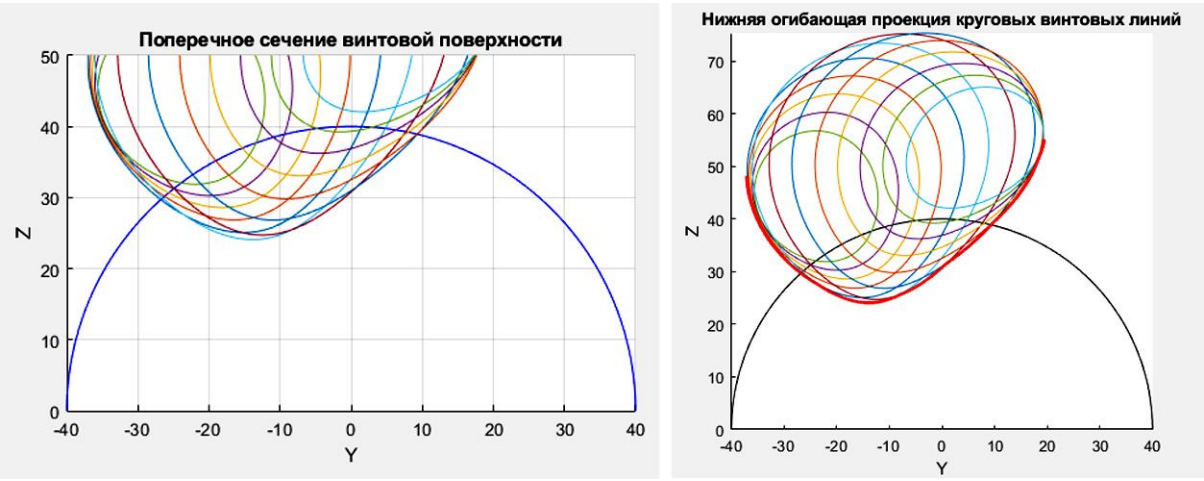
Этап 3. Создание системы координат инструмента и заготовки. Система координат заготовки расположена в начале координат: (0, 0, 0). Инструмент смещён на A = 50 мм по оси X, L = -10 мм по оси Y и по оси Z = 0, а также повёрнут вокруг оси Z на угол λ = 15° (рис. 3, а). Радиус заготовки составляет r = 40 мм, шаг винтовой канавки P = 20 мм (рис. 3, б).



а б

Рис. 3. Установка инструмента и заготовки

Этап 4. Получение круговых винтовых линий и сечения винтовой поверхности. Дискретно заданная поверхность инструмента совершает винтовое движение относительно заготовки. Проекции круговых винтовых линий на торцевое сечение заготовки показаны на рис. 4, а. Для получения торцевого сечения заготовки находится нижняя огибающая к винтовым линиям (рис. 4, б).



а б

Рис. 4. Поперечное сечение винтовой поверхности

Таким образом, в этой работе представлена методика численного моделирования процесса формообразования винтовых поверхностей с применением дискового инструмента. Разработанный подход реализован в среде MATLAB. Приведенный пример расчета подтверждает возможность эффективного применения предложенной методики для технологии обработки винтовых поверхностей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Современные методы решения задач формообразования сложного режущего инструмента / Гречишников В.А., Домнин П.В., Косарев В.А. и др. // СТИН. 2013. № 12. С. 6-11.

2. Лашнев С.И. Профилирование инструментов для обработки винтовых поверхностей. Москва: Машиностроение, 1965. 152 с.

3. Шевелева Г.И. Теория формообразования и контакта движущихся тел. Москва: Станкин, 1999. 494 с.

4. Математическая модель многокоординатного шлифования винтовых поверхностей на изделиях из высокостойких современных инструментальных материалов / П.М. Пивкин, В.А. Гречишников, Е.Ю. Малышева и др. // СТИН. 2024. № 5. С. 20-23.

5. Захаров О.В. Бесцентровое шлифование конических поверхностей на станках с продольной подачей // Автоматизация и современные технологии. 2006. № 7. С. 14-16.

6. Бржозовский Б.М., Захаров О.В. Профилирование дискового инструмента для обработки винтовых поверхностей в среде Matlab // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 10. С. 7-11.

7. Компьютерная поддержка формообразования винтовых поверхностей дисковым инструментом / А.В. Кочетков, П.М. Салов, А.А. Игнатьев, В.А. Добряков, О.В. Захаров // Вестник машиностроения. 2021. № 6. С. 11-14.

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ОСАДКЕ ПРЕССОВАНИЕМ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ЦИРКОНИЯ МАРКИ Э110

К.А. Новиков, А.В. Войко
Научный руководитель: д.т.н., доцент Фомин А.А.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В работе представлены результаты экспериментального исследования технологического процесса обработки металлов давле-*

нием (осадкой) циркония Э110 и его влияние на изменение структуры и физико-механических свойств.

Ключевые слова: *прессование, осадка, пластическая деформация, цирконий Э110*

Обработкой металлов давлением (ОМД) называют процесс, при котором происходит пластическая деформация металла, для достижения нужной формы и размера. Осадка это операция обработки металлов давлением, в результате которой уменьшается высота, и одновременно увеличиваются поперечные размеры заготовок.

Вследствие трения торцевых частей, боковая поверхность осаживаемой заготовки приобретает бочкообразную форму, это характеризует неравномерность деформации. Вследствие этого обеспечивается соответствующее расположение волокон в будущей детали (при изготовлении шестерней обеспечивается повышенная прочность зубьев в результате радиального расположения волокон). При этом возможно искажение формы заготовок, вследствие нарушения технологических режимов обработки ведет к появлению следующих дефектов: изгиб заготовки, косогранность, двойная бочкообразность формы, рюмкообразность, складки, зажимы и трещины [1].

Цирконий марки Э110 содержит до 1,5 % примесей, обладает высокой коррозионной стойкостью и хорошей обрабатываемостью резанием, давлением. Благодаря значительной пластичности циркония и его сплавов при комнатной температуре достаточно хорошо протекает холодная прокатка. Для чистого циркония можно применять обжатие при холодной прокатке порядка 70-80 % [2].

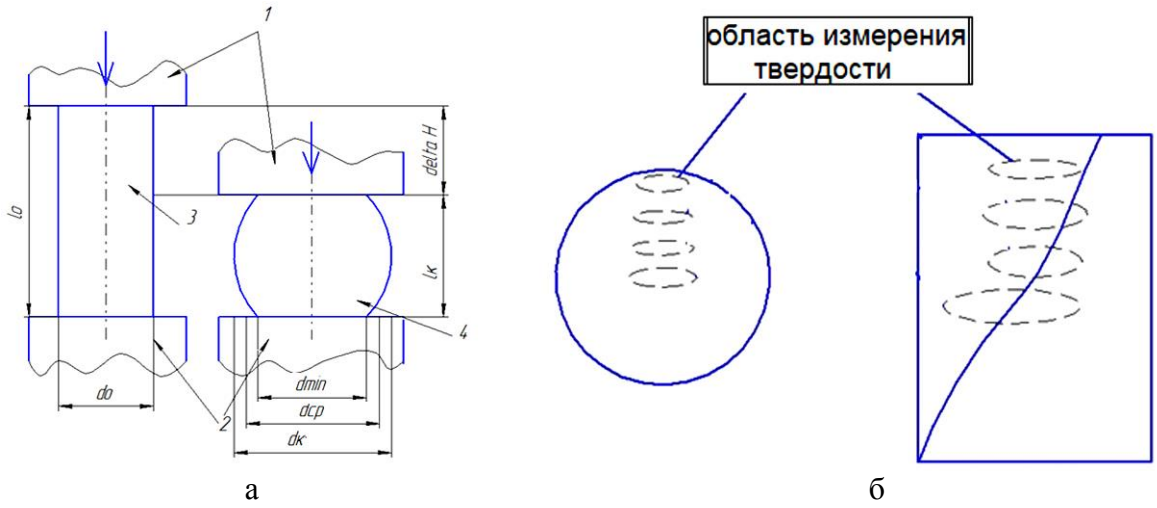
Образцы имели форму цилиндра, отличались начальной длиной l_0 = 2,87-9,79 мм и диаметром d_0 = 5,59-6,0 мм из циркония Э110 (таблица). Механические свойства исходных образцов соответствовали прутку в состоянии поставки. С помощью гидравлического пресса производили осадку двух образцов с торцовой стороны при нагрузке 4,7-6 т. После обработки измерялась длина конечная l_K и диаметр d_K (рис. 1*а*). Первый образец не подвергался деформации, он использовался в качестве эталона структуры и механических свойств.

Геометрические параметры образцов

Номер образца	Длина l_0, мм	Диаметр d_0, мм	Длина l_K, мм	Диаметр d_K, мм	Относительное сжатие δ, %	Относительное уширение ψ, %	Нагрузка P, тс
1	2,87	6,00	–	–	–	–	–
2	4,32	6,02	3,03	7,33	30	48,2	4,7
3	9,79	5,95	5,65	8,2	42,3	90	~6,0

Полученные образцы № 1 и № 2 помещались в форму на торцевую сторону, образец № 3 – на боковую, после чего заливалась эпоксидная смола и после застывания последней, производили шлифовку полученного

микрошлифа на наждачной бумаге с зернистостью от Р 180 до Р 2500. После чего все образцы были протравлены 20 % азотной кислотой. Исследование физико-механических свойств после пластической деформации включало определение микротвердости методом Виккерса, с при нагрузке 0,98 Н (100 гс). У образцов № 1 и № 2 твердость исследовалась от периферии сечения к центру, у образца № 3 от торца к центральной части (рис. 1*б*).

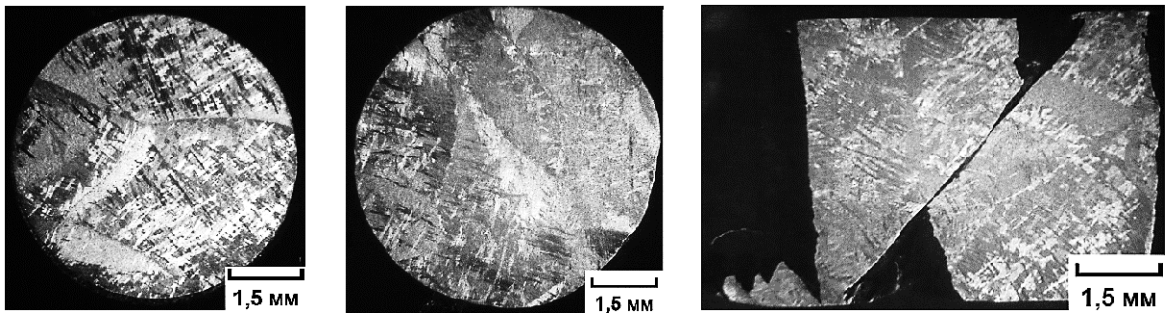


а б

Рис. 1. Процесс осадки (*а*) где 1 – пуансон, 2 – стол пресса, 3 – заготовка до деформации, 4 – заготовка после деформации, а также схема измерения микротвердости (*б*) слева – для образцов№ 1, 2, справа – для образца № 3

Макроструктура недеформированного образца характеризуется наличием выраженных границ зерен (рис. 2, *а*). После того как металл деформировали с усилием в 4,7 т (что соответствует 48,2 % уширения) структура и форма изменилась, границы фаз стали плохо прослеживаться, а также от краев к центру появились микротрещины (рис. 2*б*).

Повышение давления до 6 т привело к появлению косой трещины и последующему разрушению образца. В поперечном сечении наблюдается уплотнение структуры.



а б в

Рис. 2. Макроструктура поперечного шлифа образцов № 1 и № 2 (*а, б*) и продольный шлиф (*в*) образца № 3

Зависимость микротвердости H от глубины индентирования x и степени относительного уширения ψ носит сложный характер и может быть описана степенной функцией (рис. 3).

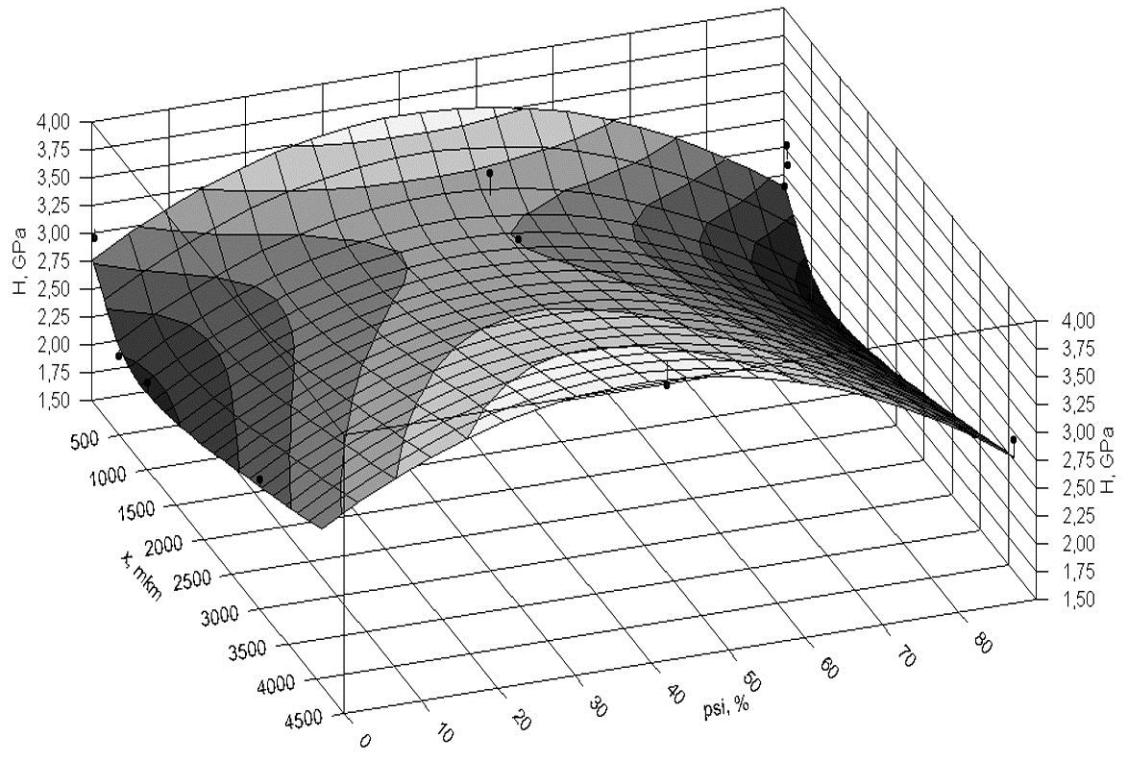


Рис. 3. Зависимость микротвердости H (ГПа) от глубины индентирования x (мкм) и степени относительного уширения ψ (%) для технического циркония Э110

Модель характеризуется коэффициентом $R^2 = 0{,}94$. В исходном состоянии ($\psi = 0$) максимум микротвердости H около 3 ГПа фиксируется в приповерхностном слое ($x < 50$ мкм).

При увеличении глубины индентирования (около 500-1000 мкм) микротвердость снижается до 2,2-2,3 ГПа. Повышенная твердость поверхности объясняется нагартованным слоем, что связано с технологическим процессом изготовления прутка циркония Э110. В центральной части образца (на глубине 3000 мкм) образец характеризуется твердостью около 2,7 ГПа.

Максимальная твердость образца № 2 $H = 3{,}4$ ГПа достигается в центральной части образца (на глубине около 4500 мкм) при $\psi \sim 50$ %. Минимальная твердость 3 ГПа наблюдается на глубине 1000 мкм. Полученные значения микротвердости циркония превышают исходные значения на 11 %, а в центральной части микротвердость увеличивается почти на 40 %. Приповерхностный слой имеет сопоставимую величину микротвердости с упрочненной центральной частью.

При наибольшей степени относительного уширения ψ, составляющей около 90 %, происходит появление микро- и макротрещин, которые

в итоге привели к разрушению образца. Приповерхностный слой, глубиной от 20 до 70 мкм, характеризуется высокой твердостью 2,4-2,8 ГПа. Однако при увеличении глубины индентирования происходит разупрочнение на 35-37 %. Непосредственно у границы трещины твердость приближена к начальной 2,6-2,7 ГПа.

Полученные результаты показывают, что при увеличении силы прессования до 4,7 т повышалась твердость циркония Э110 до 3,4 ГПа, возрастание нагрузки вело к разрушению образца.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Никифоров В.М. Технология металлов: учеб. Москва: Машгиз, 1953. 389 с.

2. Клинов И.Я. Коррозия химической аппаратуры и коррозионно-стойкие материалы. Москва: Машиностроение, 1967. 468 с.

ЛОКАЛЬНОЕ АТОМНОЕ СТРОЕНИЕ $Mo_{1.33}CT_x$ И V_2CT_x

О.Ю. Грапенко[1], А.Р. Цыганов[2]
Научный руководитель: д.ф.-м.н., Власенко В.Г.[1]

[1]Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону
[2]Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В статье приведены результаты исследования локального атомного строения методом рентгеновской спектроскопии поглощения двух типов MXene фаз: $Mo_{1,33}CT_x$ и V_2CT_x, различающихся как химическим составом, так и структурой 2D-слоев. На основе анализа XANES и EXAFS определены степени окисления и параметры локального атомного окружения ионов Mo и V в исследованных MXene фазах. Установлено, что степень окисления ванадия в V_2CT_x составила около 3,4+, а молибдена в $Mo_{1,33}CT_x$ – около 2+. Анализ EXAFS продемонстрировал наличие упорядоченных вакансий в $Mo_{1,33}CT_x$, что связано с нестехиометрическим составом этой фазы.*

Ключевые слова: *рентгеновская спектроскопия поглощения, MXene фазы, локальное атомное строение*

MXenes фазы – новое большое семейство 2D-слоистых карбидов переходных металлов привлекли большое внимание благодаря своей превосходной проводимости и уникальной слоистой морфологии. Как правило, MXenes фазы изготовляются путем селективного травления металла «А» из MAX-

фазы и имеют состав $M_{n+1}X_nT_x$ (где M – это ранний переходный металл, такой как Ti, Zr, Mo, Nb и V, A – это Al, Ga, In, Si, Ge и т. д., X может быть углеродом и/или азотом, а T_x обозначает поверхностные окончания, такие как гидроксил, кислород или фтор). Благодаря уникальной слоистой морфологии MXenes потенциально могут быть применимы в устройствах хранения энергии, включая литий-ионные аккумуляторы с высокой плотностью энергии и литий-ионные конденсаторы с высокой скоростью зарядки. В настоящей работе приведены результаты исследования двух MXene фаз: $Mo_{1,33}CT_x$ и V_2CT_x, различающихся как химическим составом, так и структурой 2D-слоев. Основной целью являлось определение локальной атомной структуры этих соединений методом рентгеновской спектроскопии поглощения.

Эксперимент

Синтез MXene проводили в Саратовском Государственном Техническом Университете имени Ю.А. Гагарина, в соответствии с методикой, описанной в работах [1]. Исходную фазу $(Mo_{2/3}Y_{1/3})_2AlC$ получали с использованием порошков Mo, Y, Al и графита. Для преобразования $(Mo_{2/3}Y_{1/3})_2AlC$ в MXene $Mo_{1.33}CT_x$ была использована стратегия гидротермального селективного травления [2]. Для получения фазы V_2AlC использовали метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [3], исходными соединениями были V_2O_5, Al, порошки графита и эвтектической смеси NaCl/KCl. Получение MXene V_2CT_x производилось травлением V_2AlC с выделением конечного продукта путем центрифугирования. V и Mo K-края поглощения для $Mo_{1,33}CT_x$ и V_2CT_x получены на станции структурного материаловедения НИЦ «Курчатовский институт» г. Москва в режиме флуоресценции с энергией электронного пучка 2,5 ГэВ и токе до 130 мА.

Результаты

Анализ XANES V K-края продемонстрировал, что степень окисления ванадия в V_2CT_x составляет примерно +3,4. Это значение является промежуточным между +3, характерным для V_2O_3, и +4, типичным для VO_2, что указывает на смешанную валентность ванадия в этом соединении. EXAFS-анализ выявил несколько интересных особенностей: первую координационную сферу (КС), состоящую из атомов C/O, на расстоянии около 2,03 Å, вторую КС, образованную атомами V, на расстоянии около 2,91 Å, отсутствие пиков, характерных для трехмерной упаковки, что подтверждает двумерную структуру. Эти данные согласуются с моделью, в которой слои V-C-V покрыты кислородсодержащими терминальными группами, образуя структуру, напоминающую VO_x/V_2CT_x.XANES Mo K-края продемонстрировал степень окисления молибдена около +2, что соответствует Mo_2C. Из анализа EXAFS установлено наличие коротких расстояний между Mo и O, составляющие примерно 1,73 Å, расстояний Mo-C и Mo-O, 2,03 и 2,59 Å, соответственно. Кроме того, выявлено расстояние Mo-Mo, равное 2,92 Å, соответствующее расстоянию между соседними атомами Mo в двумерном

слое. Полученные низкие координационные числа для этой КС указывает на наличие вакансий. Эти данные подтверждают модель нестехиометрического карбида молибдена с упорядоченными вакансиями и функциональными группами на поверхности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант No. FENW-2023-0014)

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Synthesis of 2D $Mo_{1,33}CT_z$ i-MXene with ordered vacancies by hydrothermal etching of $(Mo_{2/3}Y_{1/3})_2AlC$ i-MAX phase / Tsyganov A., Vikulova M., Zotov I., Morozova N., Korotaev E., Grapenko O., Gorokhovsky A., Gorshkov N. // Inorg. Chem. Commun. – 2024. – Vol. 170. – P. 113493.

2. Thermal behavior of the dielectric response of composites based on poly(vinylidene fluoride) filled with two-dimensional V_2CT_x MXenes / Tsyganov A., Vikulova M., Zotov I., Grapenko O., Vlasenko V., Bainyashev A., Gorokhovsky A., Gorshkov N // Nanoscale. – 2024. – Vol. 16. – P. 15208-15218.

3. Affordable combustion synthesis of V_2AlC precursor for V_2CT_x MXene / Vorotilo S., Shuck C.E., Anayee M., Shekhirev M., Matthews K., Lord R.W., Wang R., Roslyk I., Balitskiy V., Zahorodna V., Gogotsi O., Gogotsi Y. // Graphene and 2D Materials. – 2023. – Vol. 8. – P. 93-105

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА НЕФТЕПРОДУКТОВ. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ОПТИМИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИИ

А.А. Гришанов, Д.С. Кикоть, М.С. Смирнов
Научный руководитель: Новикова М.А.

НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, г. Смоленск

Аннотация. *В статье рассматриваются основные показатели качества нефтепродуктов, такие как плотность, вязкость, температура вспышки, содержание серы и другие физико-химические характеристики. Подчеркивается важность контроля этих показателей для обеспечения безопасности, эффективности и экологической чистоты нефтепродуктов. Обсуждаются современные методы анализа, которые позволяют оптимизировать процессы контроля качества. Также рассматриваются инновационные подходы к мониторингу и управлению качеством нефтепродуктов с использованием автоматизированных систем и технологий больших данных. В заключение подчеркивается необ-*

ходимость внедрения современных методов в практику для повышения надежности и устойчивости нефтяной отрасли.

Ключевые слова: *нефтепродукты, качество, показатели качества, контроль, современные методы, оптимизация, физико-химические характеристики*

Качество нефтепродуктов играет важную роль в обеспечении надежности и безопасности их использования в различных отраслях, включая транспорт, энергетику и промышленность. Понимание основных показателей качества нефтепродуктов и применение современных методов контроля, включая технологии искусственного интеллекта (ИИ), становятся важными аспектами для повышения эффективности и устойчивости [6].

Основные показатели качества нефтепродуктов будут сведены в таблицу.

Основные показатели качества нефтепродуктов

Параметры	Описание	Нормативные значения
Плотность	Масса единицы объёма при 20 °C	0,74-0,9 г/см^3 (в зависимости от продукта)
Вязкость	Сопротивление течению жидкого топлива	Измеряется в пределах 1-1000 стокса
Температура вспышки	Температура, при которой пары топлива начинают вспыхивать	>60 °C для бензина, >55 °C для дизельного топлива
Содержание серы	Количество серы в продукте	<0,05 % для Евро-5, <0,001 % для суперкаров
Октановое число	Способность бензина к детонации	≥95 для высокооктановых бензинов
Цетановое число	Способность дизельного топлива к самопроизвольному воспламенению	≥51 для обычного дизельного топлива
Содержание воды	Количество воды в нефтепродукте	<0,05 % для большинства классов топлива
Точка застывания	Температура, при которой продукт начинает застывать	Зависит от типа топлива (например, для дизелья: -20 °C)
Условная летучесть	Способность продукта образовывать пары при определённой температуре	Специфицируется в зависимости от типа продуктов

Контроль качества нефтепродуктов включает множество современных методов и технологий, направленных на обеспечение соответствия продукции стандартам и требованиям безопасности:

1. Лабораторный анализ.
2. Методы неразрушающего контроля.
3. Автоматизированные системы контроля.

4. Сенсорные технологии.
5. Моделирование и симуляция.
6. Системы управления качества.
7. Анализ данных.
8. Отчетность и сертификация.

Также большую роль играет структура физико-химических показателей качества нефтепродуктов, которые не соответствуют требованиям ГОСТ или ТУ (диаграмма 1) [1].

Поскольку современный мир не стоит на месте, использование искусственного интеллекта (ИИ) также участвует в контроле качества нефтепродуктов [2, 3]:

1. ИИ может обрабатывать большие объемы данных, получаемых из датчиков и систем мониторинга, позволяя выявлять закономерности и аномалии в качестве нефтепродуктов [4].
2. Системы машинного обучения могут предсказывать изменения в качестве продукции на основе исторических данных, что позволяет заранее принимать меры для предотвращения проблем [5].
3. ИИ помогает в оптимизации производственных процессов, к примеру, путем автоматизации регулирования температурных режимов или состава добавок, что способствует улучшению характеристик конечного продукта.
4. Системы на основе ИИ могут обеспечивать мониторинг качества нефтепродуктов в реальном времени, что позволяет быстро реагировать на любые отклонения от нормы.
5. Внедрение ИИ в системы управления производственными процессами позволяет автоматически корректировать параметры в зависимости от текущего состояния оборудования и качества сырья.

Таким образом, контроль качества нефтепродуктов является важной задачей для обеспечения их надежности и безопасности. Современные методы, включая технологии искусственного интеллекта, открывают новые горизонты для улучшения процессов контроля и оптимизации производства.

Внедрение ИИ не только повышает эффективность мониторинга, но и способствует более устойчивому развитию нефтегазовой отрасли, снижая затраты и уменьшая негативное воздействие на окружающую среду.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 6552-2020. Нефть. Методы определения физико-химических показателей.

2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001-2012. Информационные технологии. Методы управления информационной безопасностью. Требования к системам управления информационной безопасностью.

3. Александров И.П. Современные подходы к контролю качества нефтепродуктов с помощью ИИ // Нефтехимия и новое оборудование, 2019. № 20 (5). С. 56-65.

4. Борисов А.Н., Михайлова Е.П. Методы аналитического контроля качества нефтепродуктов: Обзор и перспективы // Химия и технологии топлива. 2023. № 21 (1). С. 10-18.

5. Куликов В.В. Использование машинного обучения для оптимизации качества нефтепродуктов // Современные методы анализа в нефтехимии. 2022. № 14 (2). С. 115-123.

6. Петров В.А., Сидорова С.П. Современные технологии контроля качества нефтепродуктов // Журнал нефтегазовой отрасли. 2021. № 45 (6). С. 23-30.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ FDM-ПЕЧАТИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.И. Грозный
Научный руководитель: Потапов А.А.

Тульский государственный университет, г. Тула

Аннотация. *В статье представлено исследование влияния режимов FDM-печати на физико-механические свойства изделий, изготовленных из полимерных материалов. В ходе экспериментов варьировались такие па-*

раметры, как схемы заполнения, степени заполнения, угол наклона растра. Полученные результаты показали значительное влияние указанных параметров на механические свойства изделий. На основе проведенного анализа определены оптимальные режимы печати, направленные на уменьшение времени печати при обеспечении требуемой прочности.

Ключевые слова: *FDM-печать, параметры печати, схема заполнения, степень заполнения, угол наклона растра, испытания на растяжение*

Технология FDM-печати предоставляет возможность создания изделий с вариативной внутренней архитектоникой, от монолитной до полой. Данная технологическая особенность позволяет оптимизировать материалоемкость и снизить массу конечного продукта, что является критически важным с позиции ресурсосбережения и функционального проектирования. Физико-механические характеристики изделий, полученных методом FDM, в значительной степени обусловлены параметрами внутреннего заполнения, а именно: схемой, степенью заполнения и ориентацией растра [1].

Схема заполнения представляет собой дискретизированную структуру, определяющую траекторию экструзии материала внутри объема изделия. Выбор оптимальной топологии оказывает влияние как на время производственного цикла, так и на результирующие механические свойства детали [2]. Программное обеспечение для FDM-печати предлагает широкий спектр схем, варьирующихся от простых линейных до сложных ячеистых структур.

Степень заполнения определяет процентное содержание материала в объеме изделия, принимая значения от 0% (абсолютно полое) до 100 % (полностью твердое) [3]. Как правило, увеличение коэффициента заполнения приводит к возрастанию прочностных характеристик и массы изделия. Угол ориентации растра, определяющий вектор направления движения экструзионной головки при формировании каждого слоя, оказывает существенное влияние на анизотропию механических свойств. Путем варьирования данного параметра (обычно в диапазоне от $\alpha = 0°$ до 90°) возможно регулирование прочности, ударной вязкости и характера разрушения материала [4].

В связи с этим широко распространены стратегии печати, предусматривающие последовательную укладку слоев под углами 0°, 90° и 45°. Таким образом, схема, степень заполнения и угол ориентации растра в совокупности предоставляют оператору гибкий инструментарий для прецизионной настройки свойств конечного изделия [5].

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию влияния параметров FDM-печати на свойства изделий из ПЭТГ-пластика. Результаты исследований направлены на разработку более эффективных режимов печати, позволяющих сократить время производства и обеспечить необходимую прочность деталей.

Для исследования влияния трех факторов на некоторый процесс, используя программу Minitab и методологию отклика поверхности (Response Surface), был разработан экспериментальный план, включающий 45 экспериментов. Каждый фактор варьировался на трех уровнях. Значения переменных параметров FDM-печати для проведения эксперимента представлены в таблице.

Значения переменных параметров FDM-печати

Уровень	Схема заполнения	Степень заполнения, %	α, °
1	Линии	20, 40, 60, 80, 100	0, 45, 90
2	Треугольник	20, 40, 60, 80, 100	0, 45, 90
3	Сетка	20, 40, 60, 80, 100	0, 45, 90

Предел прочности образцов определялся по результатам испытаний на растяжение, выполненных на машине РЭМ50А_РЭ в соответствии с требованиями ГОСТ 11262-2017 и стандартной процедурой. На рис. 1, 2 представлено влияние схемы, степени заполнения и угла α на прочность при растяжении и на время печати.

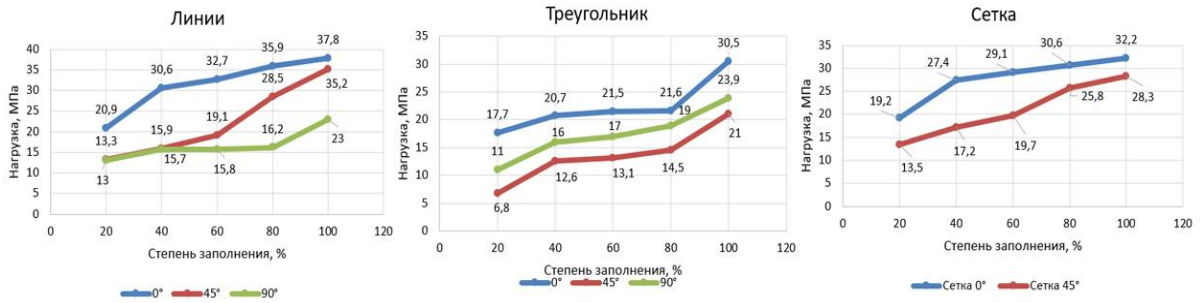


Рис. 1. Влияние схемы, степени заполнения и угла α на прочность при растяжении

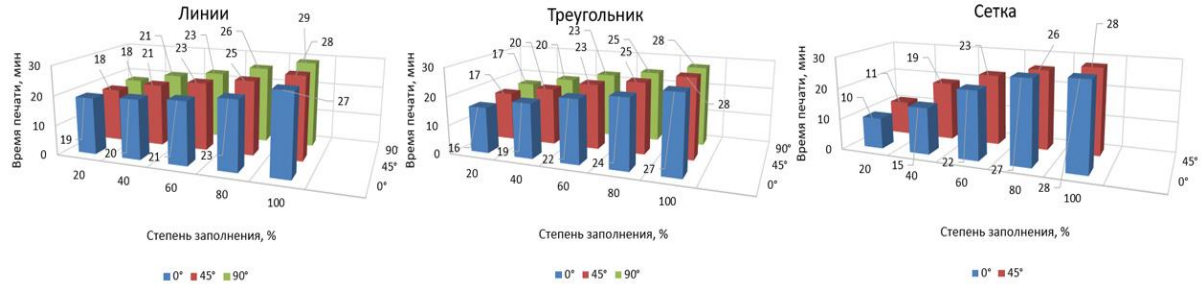


Рис. 2. Влияние схемы, степени заполнения и угла α на время печати

Результаты показали, что максимальную прочность при растяжении (37 МПа) демонстрируют образцы с линейным заполнением (0°) и 100 % плотностью. Увеличение угла наклона растра до 90° снижает прочность на 25-30 %. Схема заполнения имеет меньшее влияние (до 5-7 %) по сравнению со степенью заполнения, снижение которой на 55-60 % приводит к су-

щественному ухудшению прочности. Это ухудшение связано с концентрацией напряжений в местах пересечения нитей под углом и с увеличением количества пустот при низкой степени заполнения. Также установлено, что снижение степени заполнения на 35-40 % сокращает время печати на 50-60 % и снижает массу изделия, но ухудшает его механические свойства.

В результате исследования были выявлены оптимальные параметры FDM-печати (схема заполнения, степень заполнения и угол наклона растра) для достижения максимальной прочности при минимальном времени изготовления изделий.

В ходе сравнительного анализа схем заполнения «Линии», «Сетка» и «Треугольник» было установлено, что для схемы «Линии» оптимальным является использование степени заполнения 80 % при угле наклона растра 0°. Данная комбинация параметров обеспечивает наилучшее соотношение между прочностью и временем печати.

Результаты исследования показывают, что правильный подбор параметров позволяет значительно ускорить процесс FDM-печати, сохраняя при этом необходимый уровень прочности изделий. Это открывает возможности для повышения производительности и снижения затрат в FDM-производстве.

Исследование выполнено в рамках государственной программы (FEWG-2024-0002) и работы студенческого конструкторского бюро «Полимерные композиты и технологическая оснастка» по договору № 9 от 30.11.2024.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Clarke T., Hosseini A. Effects of print parameters on tensile characteristics of additively manufactured polyethylene terephthalate-glycol (PETG). *Int J Adv Manuf Technol* 125, 4953-4974 (2023). https://doi.org/10.1007/s00170-023-11003-1.

2. Dolzyk G., Jung S. Tensile and fatigue analysis of 3D-printed polyethylene terephthalate glycol. *J. Fail. Anal. Preven.* 19, 511-518 (2019). https://doi.org/10.1007/s11668-019-00631-z.

3. Sepahi M.T., Abusalma H., Jovanovic V. *et al.* Mechanical Properties of 3D-Printed Parts Made of Polyethylene Terephthalate Glycol. *J. Mater. Eng. Perform.* 30, 6851-6861 (2021). https://doi.org/10.1007/s11665-021-06032-4.

4. Akhoundi B., Behravesh A.H. Effect of Filling Pattern on the Tensile and Flexural Mechanical Properties of FDM 3D Printed Products. *Exp. Mech.* 59, 883-897 (2019). https://doi.org/10.1007/s11340-018-00467-y.

5. Kautilya S. Patel, Dhaval B. Shah, Shashikant J. Joshi, Faisal Khaled Aldawood, Mohamed Kchaou, Effect of process parameters on the mechanical performance of FDM printed carbon fiber reinforced PETG, *J. Mater. Res. Technol.*, 8006-8018, (2024) https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.184.

ПРОЦЕСС ОБРАБОТКИ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ИНСТРУМЕНТОВ СВЁРТОЧНОЙ НЕЙРОСЕТИ MatLab

А.И. Дасаева
Научный руководитель: д.т.н., профессор Полосин В.Г.

Пензенский государственный университет, г. Пенза

Аннотация. *В данной статье рассматривается модель нейросетевой обработки томографических изображений для диагностики злокачественных заболеваний головного мозга. На основе исследований разработан программный комплекс в среде MATLAB для повышения точности медицинской диагностики. Используя составленные алгоритмы машинного обучения, программа позволяет эффективно классифицировать и диагностировать злокачественные патологии. Модель нейросетевой обработки в среде MatLab позволяет обрабатывать большие объёмы данных и предоставлять работникам медицинских организаций точные результаты.*

Ключевые слова: *опухоль, магнитно-резонансная терапия, обработка изображений, MATLAB, сверточная нейросеть, AlexNet, ROI, автоматическая классификация, диагностика*

В современном мире опухоли головного мозга занимают первое место среди жизнеугрожающих заболеваний, и порой человеческих знаний и опыта бывает недостаточно для стопроцентной диагностики. В связи с этим, учёные стремятся создавать автоматизированные программные средства, которые способны быстро и точно обнаруживать потенциальные участки патологии. Технологии глубокого обучения искусственного интеллекта активно развиваются и доказывают эффективность в диагностике опухолевидных процессов. Одним из таких обучений является программный комплекс на базе MATLAB, который предназначен для разработки свёрточных нейронных сетей.

В настоящий момент существует база данных МРТ-снимков и инструменты предобученной нейросети AlexNet, позволяющие создавать модели систем выявления злокачественных новообразований головного мозга на базе МРТ-снимков.

Использование методы фильтрации, нормализации, сегментации и инструменты свёрточной нейронной сети, хорошо представленных в среде MatLab, совместно с архитектурой свёрточной нейронной сети AlexNet, позволила классифицировать изображения по различным категориям объектов. AlexNet, разработанная в 2012 году Алексеем Крижевским, считается первым широко известным применением глубоких свёрточных сетей в крупномасштабном визуальном распознавании.

Архитектура AlexNet содержит 8 слоев:

– первые пять – сверточные слои, за некоторыми из них следуют слои максимального объединения.

– последние три – слои с полносвязными соединениями.

Сеть, за исключением последнего слоя, разделена на две копии, каждая из которых работает на одном графическом процессоре.

Структура архитектуры представлена в виде на рис. 1.

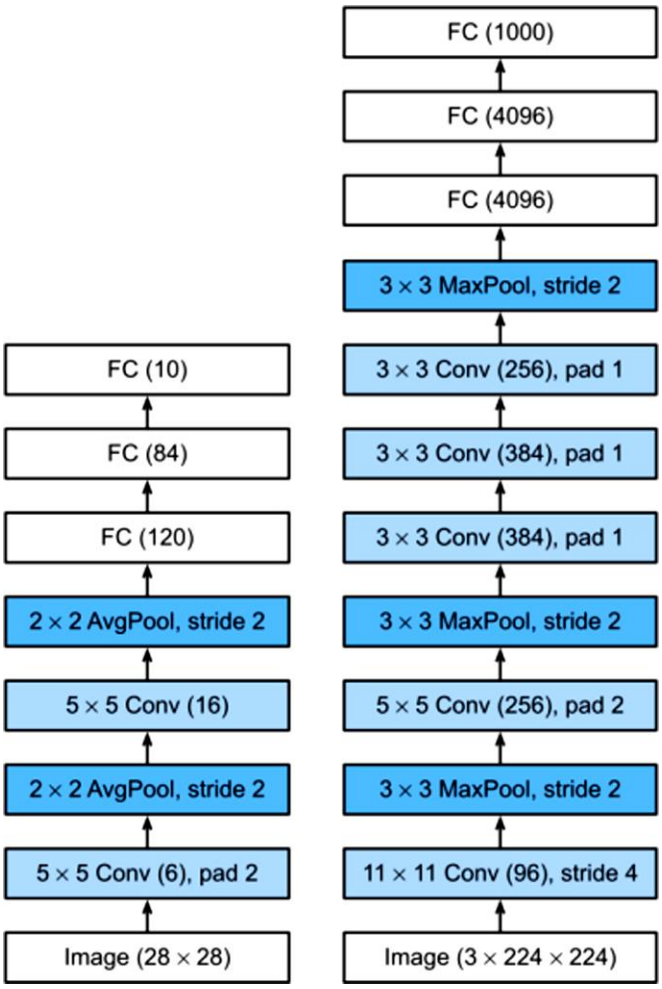


Рис. 1. Структурная схема AlexNet

Эта архитектура повлияла на большое количество последующих работ в области глубокого обучения, особенно в применении нейронных сетей к компьютерному зрению [1].

В данной статье сеть AlexNet была использована при моделировании процессов обработки и классификации снимков томографических изображений в составе инструментов свёрточной нейросети MatLab. На классических томографических изображениях могут присутствовать различного вида артефакты, дающее в последствие ложные результаты для диагностики. AlexNet способна выходить за рамки сугубо пиксельных критериев и рассматривать более сложные паттерны.

В представленной работе разработан комплекс программных средств классификации МРТ – снимков для обнаружения опухолей головного мозга и изучения особенностей опухолевых тканей с использованием AlexNet. Для обучения использовано 2 вида классификации: Опухоль обнаружена/Опухоль не обнаружена. Результат обучения представлен на рис. 2.

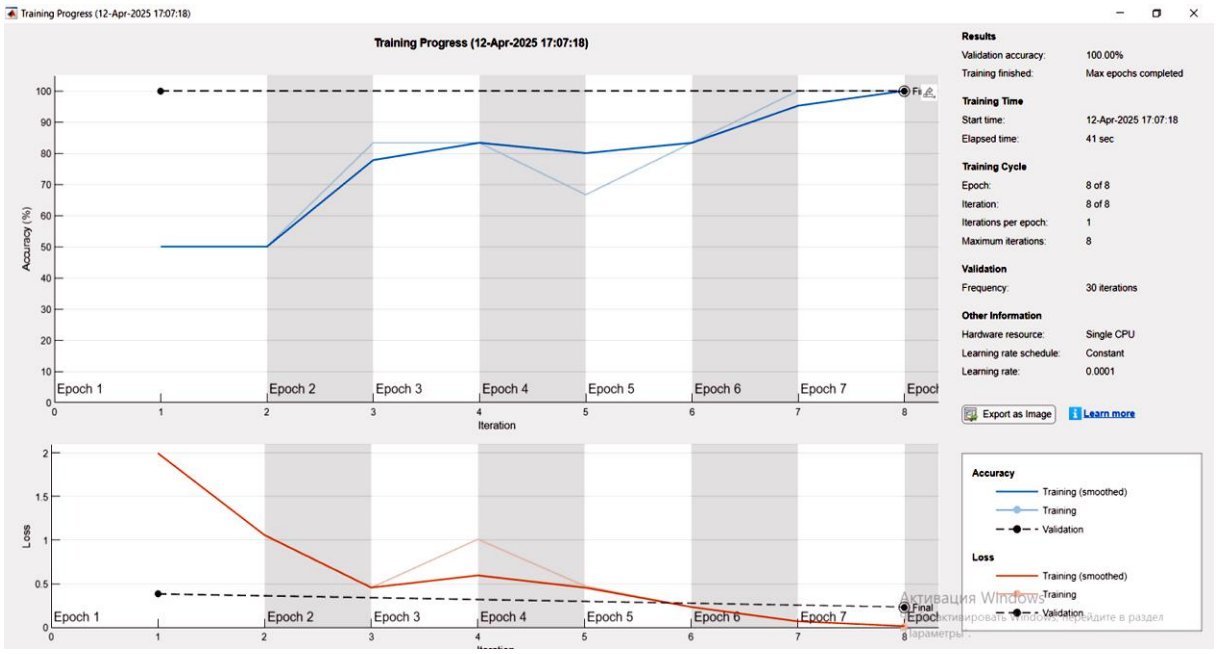


Рис. 2. Обученная сеть AlexNet

После обучения сети приступаем к обработке снимков.

Для работы были взяты снимки из официального рентгенологического сайта [2]. Алгоритм работы состоял из нескольких этапов:

1. Считывание: принятие изображения через uigetfile. Снимки из базы данных были представлены в формате DICOM. Для более удобного использования снимки были конвертированы в JPG.

2. Изменение размера к 227×227 пикселям, т. к. AlexNet считывает изображения только с данным размером.

3. Преобразование к уровню серого (если оно rgb), упрощая дальнейший анализ [3].

4. Фильтрация методом anisodiff (с параметрами num_iter, delta_t, kappa), важными для контроля над степенью размывания.

5. Нормализация яркости.

6. Сегментация. В разработанном алгоритме используется пороговая схема, где вычисляется средняя интенсивность t0, к которой добавляется часть (max + min)/2. Так формируется адаптивный порог, который разделяет пиксели на «яркие» и «тёмные».

Также применяется:

• bwlabel для идентификации областей,

• regionprops для подсчёта площади, плотности, bounding box,

• морфологические операции (erode, imfill) для очистки от артефактов и формирования связной маски.

Самая большая и плотная область (по критерию Solidity и Area) принимается за «вероятную опухоль». Затем контур уточняется путём вычитания эрозированного варианта, давая границу опухоли. Визуально она выделяется красным цветом, а также рисуется bounding box [4]. Результат представлен на рис. 3.

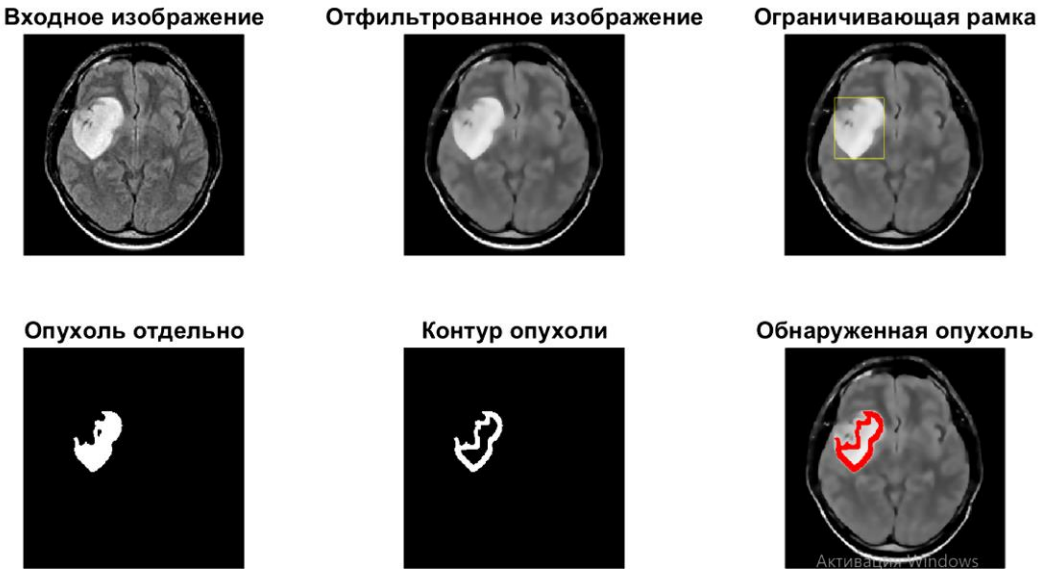


Рис. 3. Пошаговая иллюстрация обработки и обнаружения опухоли

В результате получается изображение с минимальным шумом, где опухоль будет более различима для пороговых методик. Для тестов применялась выборка из 20 изображений: 10 содержали различные опухоли, 10 были без патологий. Результат представлен на рис. 4.

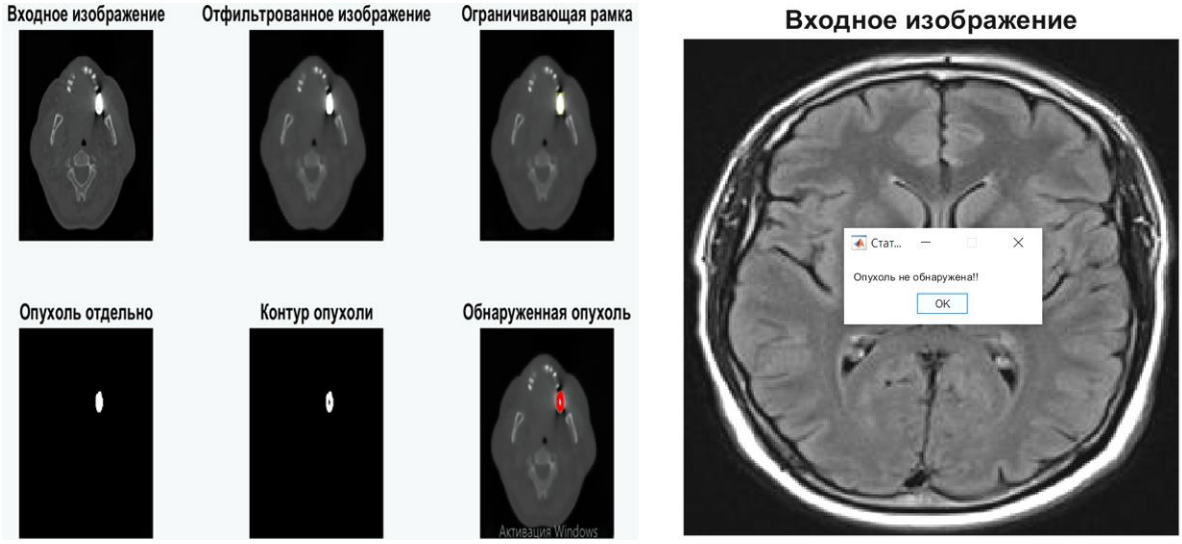


Рис. 4. Положительный и отрицательный результат работы программы

Таким образом, можно сделать вывод о том, что создание комплекса программ в середе MatLab для процесса обработки томографических изображений в среде MatLab на основе искусственного интеллекта открывает новые горизонты в области медицинской диагностики. Эти технологии повышают точность и скорость диагностики, и предоставляют медицинским работникам мощные инструменты для борьбы с опасными заболеваниями. В будущем такие решения станут неотъемлемой частью медицинской практики, обеспечивая более качественное и своевременное лечение пациентов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. AlexNet. – URL: AlexNet – Wikipedia (дата обращения: 10.04.2025).
2. DICOM архив. – URL: DICOM архив (дата обращения: 11.04.2025).
3. Deep Learning with MATLAB. – URL: Deep Learning with MATLAB | RC Learning Portal (дата обращения: 11.04.2025).
4. Ronneberger O. et al. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // MICCAI, 2015.

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ НАГРУЗКИ НА ОКОННУЮ СЕТКУ

И.А. Жданов
Научный руководитель: д.т.н., с.н.с. Пичхидзе С.Я.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В статье проведен анализ различных вариаций материалов для изготовления оконных сеток.*

Ключевые слова: *напряжение, прочность, запас прочности, оконная сетка*

Известно [1-3], что в современных условиях развития строительной отрасли особое внимание уделяется качеству и надежности элементов оконных конструкций. Оконные сетки являются важным компонентом оконных систем, обеспечивающим защиту от насекомых, пыли и мелких предметов при одновременном обеспечении естественной вентиляции помещений и относительной безопасности детей. Развитие материаловедения открывают новые возможности для создания усовершенствованных конструкций оконных сеток с улучшенными характеристиками.

Цель работы: изучение механических и эксплуатационных свойств различных материалов (полиамид, нейлон, графит) для определения

наиболее подходящего материала при создании современных оконных сеток повышенной прочности.

Методология. В рамках исследования были выбраны следующие материалы для анализа:

1. Нейлон (Нейлон 4.6) – ГОСТ ISO 2076 – 2015 [4]
2. Полиамид (Полиамид 6) – ГОСТ 31014-2002 [5]
3. Графит (МГ-1) – ГОСТ 17022-81 – [6]

Для каждого материала были определены следующие параметры:

• прочность на разрыв (МПа): определяется в результате испытаний на растяжение,

• упругость на изгиб (МПа): оценивается по способности материала восстанавливать свою форму после деформации.

Результаты. Ниже приведены следующие результаты испытаний:

1. Предел текучести: наибольший показатель смог продемонстрировать нам Нейлон (Нейлон 4.6), это показывает, что он лучше справится с большой нагрузкой без серьезных последствий.

2. Коэффициент запаса прочности: по итогам проведенных экспериментов лучше всего себя показал Нейлон (Нейлон 4.6), что обеспечивает надежность конструкции. Близко к этому показателю приблизился графит **(**МГ-1), что дает понимание того, что он может составить конкуренцию Нейлону 4.6.

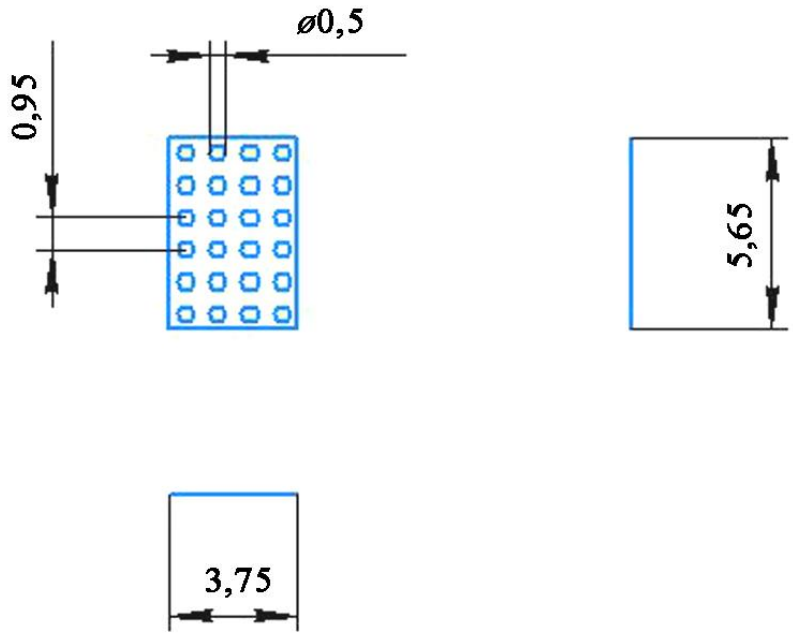


Рис. 1. Фрагмент сети из испытуемой модели

Для исследования взята ячеистая модель оконной сетки размерами 5 × 20 × 1 мм. Для расчета прочностных характеристик материалов использовалась программа Solidworks Simulation.

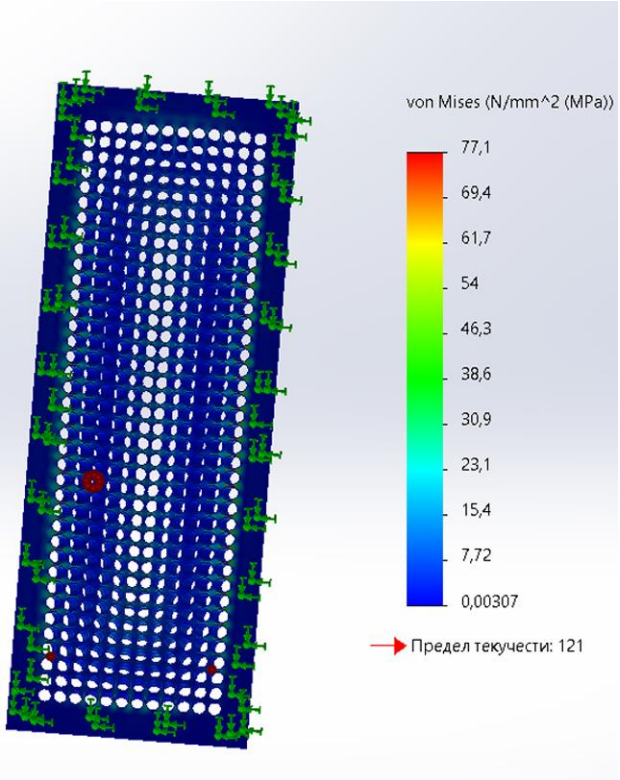


Рис. 2. Результаты расчёта статических напряжений по Мизесу на графитовую сетку при 2 Н/мм^2

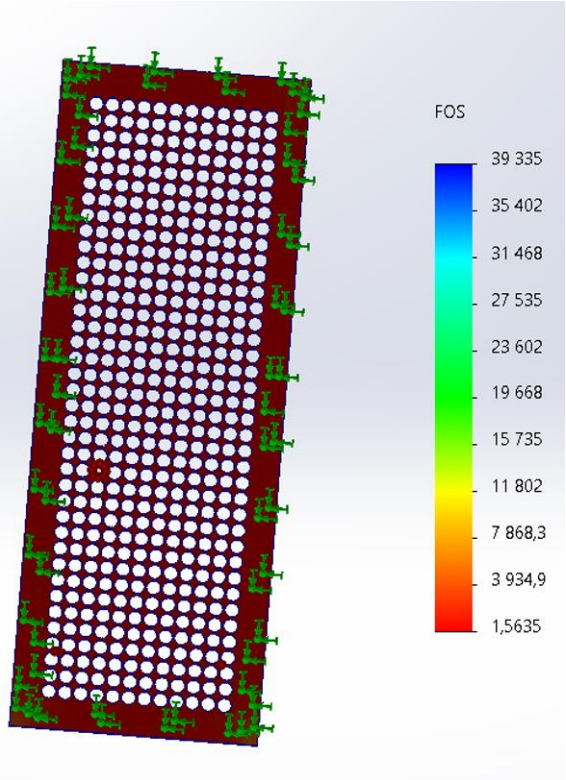


Рис. 3. Коэффициент запаса прочности графитовой сетки при давлении 2 Н/мм^2

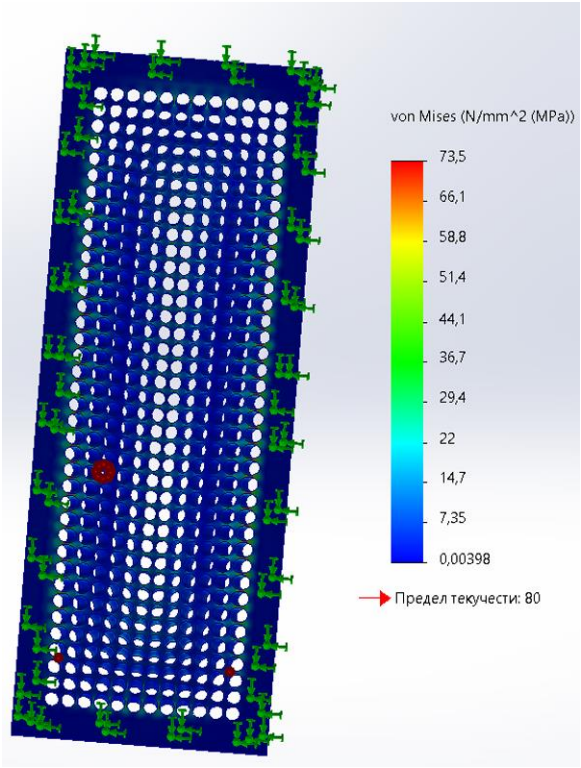


Рис. 4. Результаты расчёта статических напряжений по Мизесу на полиамидную сетку при 2 Н/мм^2

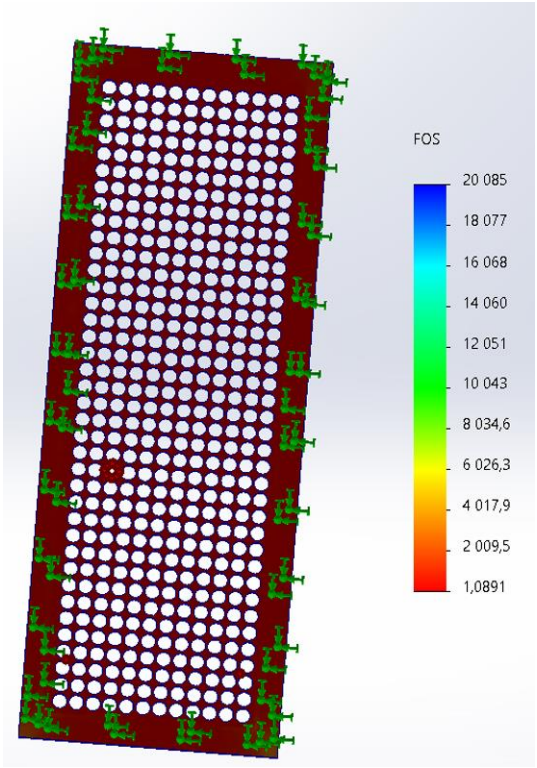


Рис. 5. Коэффициент запаса прочности полиамидной сетки при давлении 2 Н/мм^2

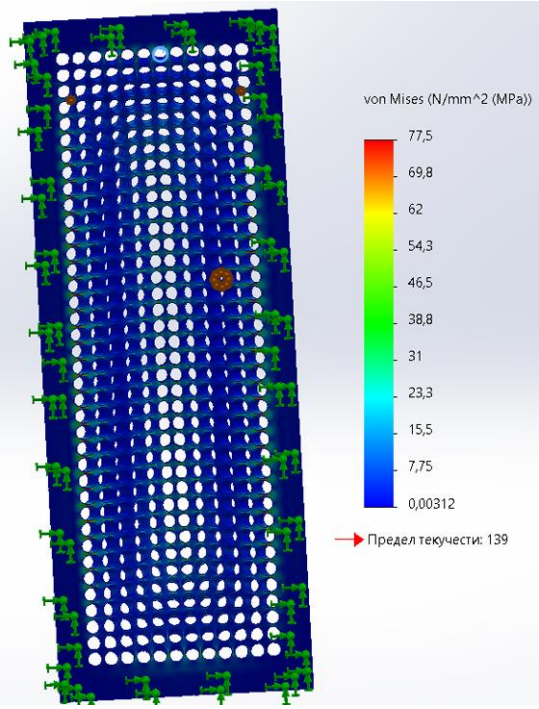


Рис. 6. Результаты расчёта статических напряжений по Мизесу на нейлоновую сетку при 2 Н/мм^2

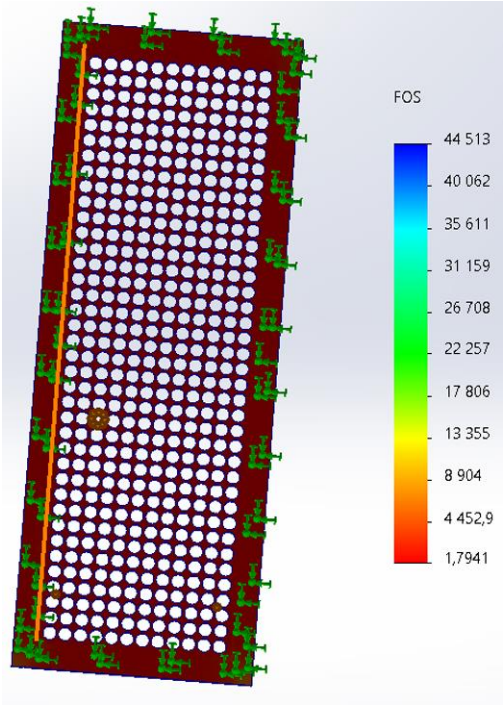


Рис. 7. Коэффициент запаса прочности нейлоновой сетки при давлении 2 Н/мм^2

Напряжение, приложенное к модели, соответствовало давлению, создаваемым человеком (ребенком) весом примерно 20 кг. Также были исследованы напряжения, соответствующие нагрузке ребенка на сетку площадью 100 мм^2. Результаты статических расчётов приведены на рис. 2-7. Значения запаса прочности при приложении давления на различные сетки рассчитывались для каждого материала отдельно.

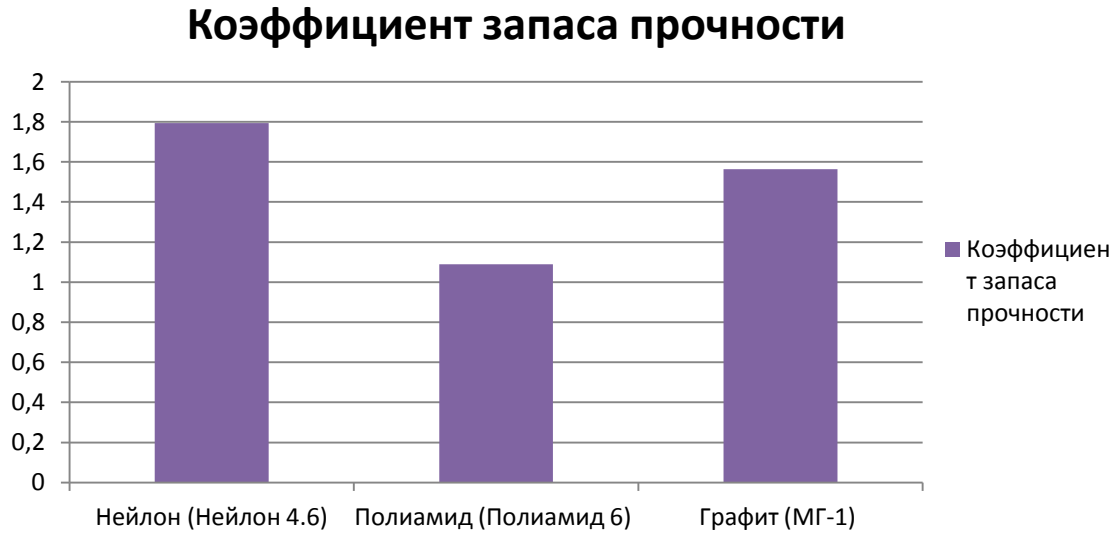


Рис. 9. Коэффициенты запаса прочности исследуемых материалов

Практические рекомендации

Для нейлоновой сети рекомендуется провести дополнительные испытания на долговечность и устойчивость к внешним воздействиям.

При использовании графита следует предусмотреть дополнительные меры защиты от механических повреждений. Полиамидная сеть требует более осторожного обращения и может нуждаться в более частой замене.

Выводы

Проведен оптимальный выбор материала оконной сетки. Показано, что нейлон является наиболее подходящим материалом для изготовления оконной сетки, так как обеспечивает максимальный запас прочности. В качестве альтернативного варианта может быть использован графит в случаях, где важны антифрикционные свойства и химическая стойкость. Полиамид рекомендуется использовать при некритичных требованиях к прочности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. https://r-meister.ru/info/ nejlon-poliamid-66/
2. https://ru.wikipedia.org/ wiki/Предел_текучести
3. https://ru.wikipedia.org/ wiki/Коэффициент_запаса
4. https://files.stroyinf.ru/Da-ta/631/63191.pdf
5. https://ohranatruda.ru/upload/ iblock/95e/4294845339.pdf https://star-pro.ru/gost/17022-81

ИССЛЕДОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОЛИТИТАНАТА КАЛИЯ РАЗЛИЧНЫМИ СОЛЯМИ ТРЕХВАЛЕНТНОГО ЖЕЛЕЗА

Д.Д. Завитаева
Научный руководитель: д.х.н., профессор Гоффман В.Г.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В работе представлены результаты модифицирования полититаната калия различными солями трехвалентного железа. Для этого проводились исследования структурных и электрофизических свойств полученных материалов.*

Ключевые слова: *полититанат калия, придерит, керамика*

В настоящее время конденсаторы на основе материалов с контролируемыми диэлектрическими свойствами являются весьма важными компонентами электронной техники [1].

Голландитоподобные соединения, имеют общую формулу $A_xB_8O_{16}$, где A – щелочные или щелочноземельные катионы, например, K, Na, Ba, Sr, Rb и Cs, а B – смесь четырехвалентных и трехвалентных катионов в кислородном октаэдре [2].

Ионы Fe^{+3} легко внедряются в кристаллическую решетку полититаната калия из-за близкого ионного радиуса и легко могут заменить ионы с близким радиусом в структуре полититаната калия [3].

Для эксперимента синтезировался полититанат калия (ПТК) по стандартной технологии в соотношении 30масс.%:30масс.%:40масс.%. Модифицирование ПТК проводилось по оригинальной технологии кафедры ХИМ СГТУ имени Гагарина Ю.А. [4]. Для этого брались 3 соли трехвалентного железа: $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$, $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ и $FeCl_3 \cdot 6H_2O$.

Для изучения структурных свойств полученных продуктов проводился рентгенофазовый анализ (рис. 1).

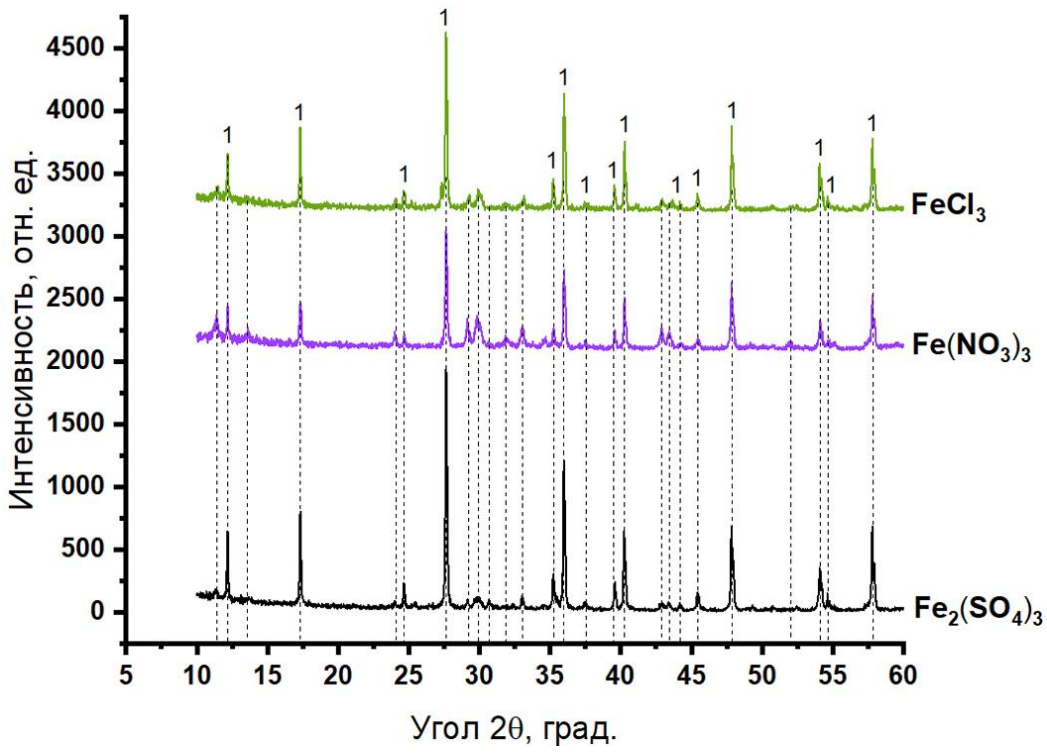
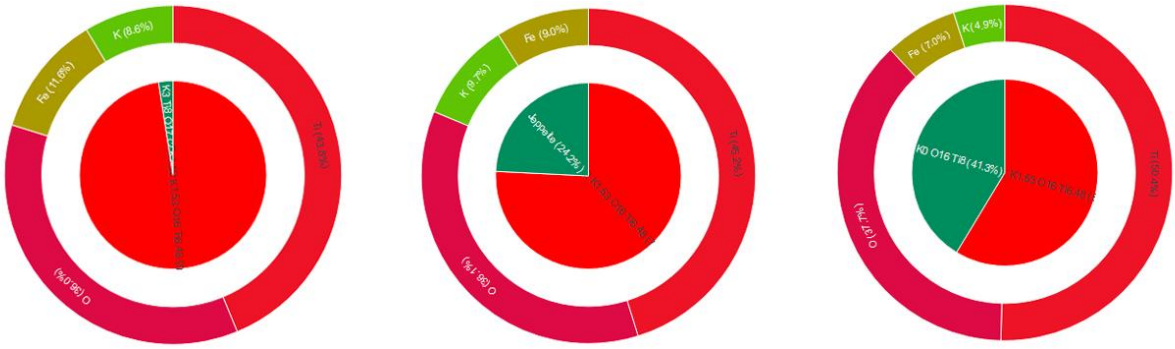


Рис. 1. Рентгенограммы полученных продуктов: 1 – $K_{1,53}Fe_{1,52}Ti_{6,48}O_{16}$

На дифрактограмме для сравнения выделена только основная фаза – $K_{1,53}Fe_{1,52}Ti_{6,48}O_{16}$ (голландит железа, придерит). При расшифровке в программе Match! оставшиеся пики были идентифицированы как различные титанаты калия, которые отличаются интенсивностью и углом 2θ.

Если рассматривать более подробное процентное содержание голландита (рис. 2), то ПТК, модифицированный солью $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, содержит фазу голландита в количестве 58,7 % в отличие от составов с $Fe_2(SO_4)_3$ – 97,5 % и $Fe(NO_3)_3$ – 75,8 %.



а б в

Рис. 2. Диаграммы процентного содержания фаз в полученных продуктах:
а – $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$; б – $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$; в – $FeCl_3 \cdot 6H_2O$

Для исследования электрофизических свойств применялась импедансная спектроскопия. Тангенс диэлектрических потерь на частоте 1 кГц показал различные результаты для разных составов (рис. 3).

С сульфатом железа (III) было получено значение тангенса потерь равное 0,15, а с остальными солями – примерно одинаковые значения – 0,37 и 0,33.

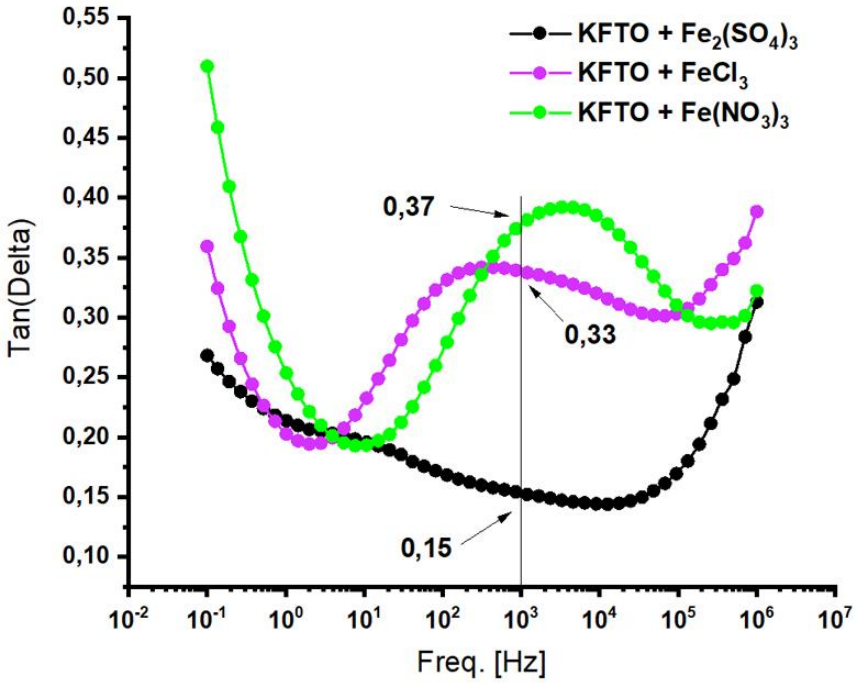


Рис. 3. Зависимость тангенса диэлектрических потерь
от частоты полученных продуктов

Диэлектрическая проницаемость практически одинакова для всех трех образцов на частоте 1 кГц (рис. 4). Как можно заметить, визуально, кривая с сульфатом железа (III) отличается от других зависимостей и имеет наивысшее значение равное 1881.

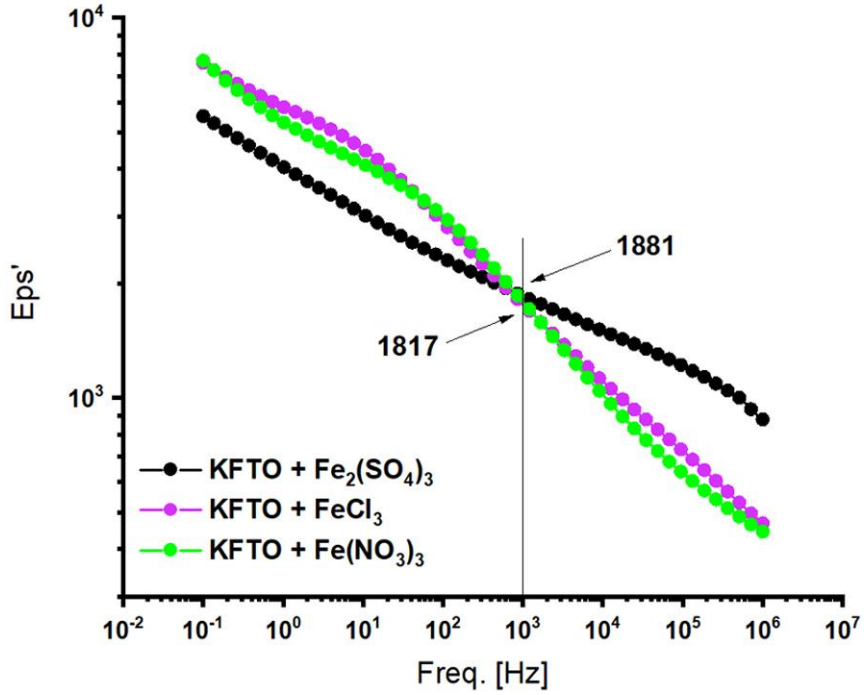


Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости
от частоты полученных продуктов

На рис. 5 изображена линейная зависимость модуля проводимости от частоты. Все кривые незначительно отличаются друг от друга и на низких частотах проводимость достигает значений 10^{-10} См/см и ниже, на высоких частотах не превышает 10^{-3} См/см.

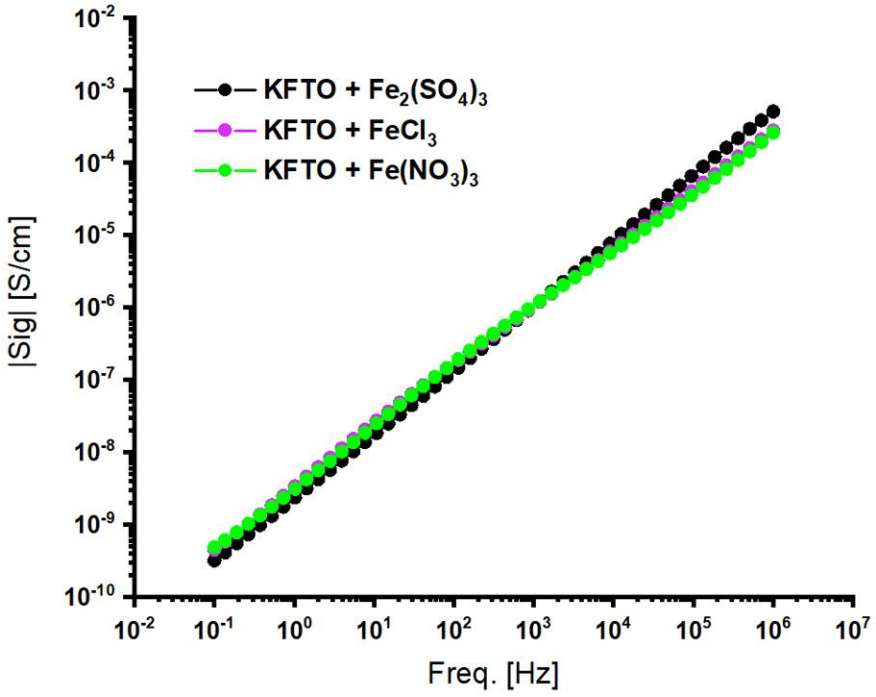


Рис. 5. Зависимость модуля проводимости
от частоты полученных продуктов

Таким образом, можно сделать вывод, что образец с сульфатом железа (III) показал наилучшие результаты, такие как tgδ = 0,15, а диэлектрическая проницаемость составила 1881 на частоте 1 кГц. Полученные результаты будут улучшаться в дальнейших работах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Synthesis of the hollandite-like copper doped potassium titanate high-k ceramics / Nikolay Gorshkov [et al.] // Ceramics International. 2020.

2. Crystal growth of potassium titanates in the system K_2O-Fe_2O_3-TiO_2 / T. Endo [et al] // J. Cryst. Growth. 1986. P. 423-430.

3. Novel Single-Crystal Hollandite $K_{1,46}Fe_{0,8}Ti_{7,2}O_{16}$ Microrods: Synthesis, Double Absorption, and Magnetism / H. Qadeer-Ul [et al.] // Inorganic Chemistry.2018.

4. Синтез голландита типа придерита / Д.Д. Завитаева [и др.] // Наука и образование: достижения и перспективы: сборник трудов VI Международной научно-практической конференции. Саратов, 2022. С. 145-147.

СОЗДАНИЕ ПРИВОДА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БПЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ

И.С. Здобников
Научный руководитель: Тимофеев М.Н.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В статье рассказывается о макетировании привода позиционирования БПЛА с применением аддитивных технологий.*

Ключевые слова: *аддитивные технологии, макетирование, беспилотные технологии*

В рамках создания станции автоматизированного обслуживания беспилотных летательных аппаратов необходимо было создать узел позиционирования летательного аппарата.

Он необходим для того, чтобы зафиксировать дрон в необходимом для корректной работы станции положении, что подразумевает соотнести ось аккумулятора БПЛА и ось захвата, который выполняет функцию снятия и установки аккумулятора на дрон.

Было спроектировано устройство, которое посредством рейлинга с углом в основании 120° (рис. 1) позиционирует БПЛА, привод которого

осуществляется посредством скрытого механизма, находящегося под столом позиционирования (рис. 2), состоящего из двух металлических направляющих, шпильки с резьбой М12, мотора редуктора.

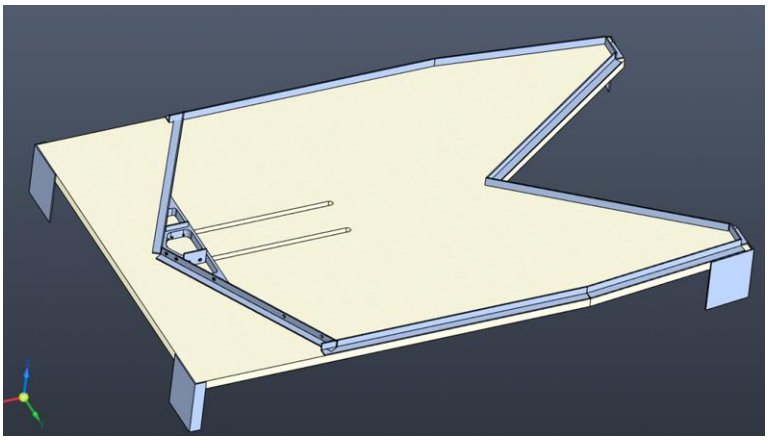


Рис. 1. Стол позиционирования

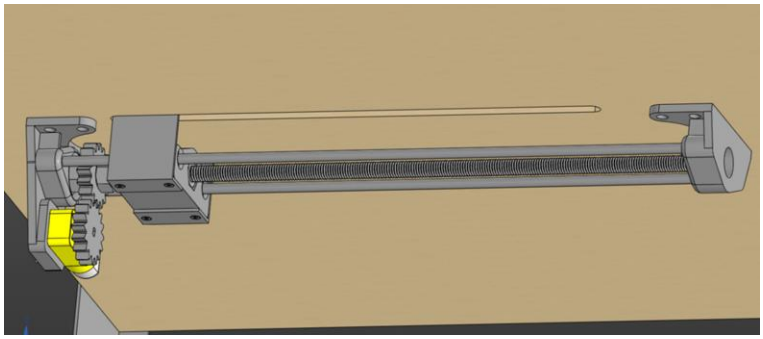


Рис. 2. Привод позиционирующего рейлинга

Для создания подшипниковых опор, подвижного блока, зубчатых колёс и крепления рейлинга было принято решение создавать их методом 3D-печати. Такое решение позволит создать более дешевый аналог шарико-винтовой передачи, оптимизировав данную конструкцию под необходимые размеры и сократить расходы на создание прототипа.

Каждый из необходимых элементов был создан в качестве 3D-модели в программе Компас 3D v23 (рис. 3, 4).

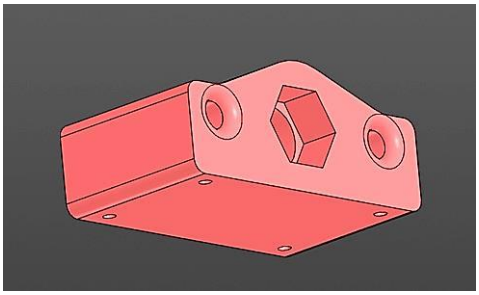


Рис. 3. Подвижный блок механизма

Далее все необходимые элементы были воссозданы на принтере компании Creality модели Ender-3, использовался ABS пластик марки Geek Fil/lament в виде прутка диаметром 1,75 мм. Печать велась при температуре сопла 200 °С и подогреве стола 90 °С, процент заполнения внутренней структуры составил 30 %.

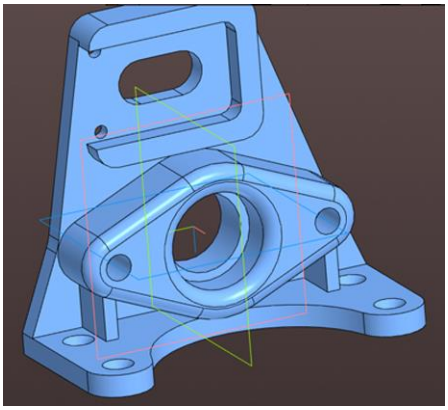


Рис. 4. Подшипниковая опора с креплением под двигатель

По итогу были получены модели (рис. 5), которые обеспечивают работоспособность механизма и необходимую точность его работы. Это говорит о том, что технологии 3D-печати могут серьезно облегчить процесс создания прототипов различных механизмов, позволив сократить финансовые расходы, а также изначально создав деталь, наиболее подходящую под проектируемую систему.

Рис. 5. Готовая модель в сборке

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Как 3D-принтеры используют для производства дронов? (Ч. 1) // Lider-3D. 2023. URL: https://lider-3d.ru/blog/ stati/kak-3d-printery-ispolzuyut-dlya-proizvodstva-dronov-chast-1/ (дата обращения: 09.05.2025).

2. Оптимальные температурные режимы для 3D-печати из PLA, нейлона и других материалов // Top3DShop. URL: https:// top3dshop.ru/blog/temperaturnye-rezhimy-dlja-3d-pechati.html (дата обращения: 09.05.2025).

3. Революция в мире беспилотников: Как новые 3D-принтеры делают создание дронов доступным для всех // RCMonster. URL: https://rcmonste.ru/blog/article/revolyuciya-v-mire-bespilotnikov-kak-novye-3d-printery-delayut-sozdanie-dronov-dostupnym-dlya-vseh (дата обращения: 09.05.2025).

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ И АДГЕЗИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ ПОКРЫТИЙ $Zr_{1-X}Al_XN$

А.Ю. Клочков
Научный руководитель: д.т.н., профессор Каменева А.Л.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь

Аннотация. *В данной статье исследовано влияние двух- и трехкомпонентных фаз δ-Zr_3N_4, w-AlN, w-$Zr_{0,5}Al_{0,5}N$ и c-$Zr_{0,5}Al_{0,5}N$, образующихся в процессе формирования системы Zr-Al-N импульсным магнетронным распылением на коэффициент трения и адгезионную прочность покрытия $Zr_{1-x}Al_xN$.*

Ключевые слова: *покрытия $Zr_{1-x}Al_xN$, фазы δ-Zr_3N_4, w-AlN, w-$Zr_{0,5}Al_{0,5}N$ и c-$Zr_{0,5}Al_{0,5}N$, коэффициент трения, адгезионная прочность*

Трибологические и адгезионные свойства покрытий $Zr_{1-x}Al_xN$ в большей степени определяются их фазовым составом, направлением преимущественной кристаллографической ориентации и деформацией кристаллической решетки [1-3].

Целью данной работы является установление влияния двух- и трехкомпонентных фаз δ-Zr_3N_4, w-AlN, w-$Zr_{0,5}Al_{0,5}N$, c-$Zr_{0,5}Al_{0,5}N$, образующихся в процессе формирования системы Zr-Al-N импульсным магне-

тронным распылением, на коэффициент трения и адгезионную прочность покрытия $Zr_{1-x}Al_xN$.

Для повышения адгезии покрытия $Zr_{1-x}Al_xN$ к подложке поверхность исследуемых образцов очищалась в тлеющем разряде в аргоне и ионной очисткой с использованием электродугового испарителя в течение 10-15 минут. Покрытия $Zr_{1-x}Al_xN$ получали на модернизированной установке ННВ-И1 импульсным магнетронным распылением на подложках из стали 03Х11Н10М2Т и твердого сплава ВК8.

Элементный состав мишеней: сплав циркония Э110 и алюминий высокой чистоты А99. Напряжение смещения на подложке ($U_{см}$) изменяли в интервале: $U_{см}$ = -100 В, -150 В, -200 В. Остальные технологические параметры: Р – давление газовой смеси аргона и азота, $I_{маг}$ и $U_{маг}$ – ток и напряжение на магнетроне, N_2 – содержание азота в газовой смеси, Т – продолжительность осаждения были постоянными или изменялись незначительно ($I_{подл}$ – ток на подложке) (таблица 1).

Таблица 1

Технологические параметры осаждения покрытия $Zr_{1-x}Al_xN$ импульсным магнетронным распылением

Номер покрытия	$U_{см}$, В	$I_{подл}$, А	$U_{маг}$, В		$I_{маг}$, А (Zr и Al)	Р, Па	N_2, %	Т, мин
			Zr	Al				
1	100	0,38	420	450	6	0.75	10	60
2	150	0,40	400	380				
3	200	0,41	380	350				

Дифрактограммы получали с участков покрытий $Zr_{1-x}Al_xN$ на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-6000 в Cu-Kα – излучении при напряжении 30 кВ, силе тока 20 мкА, времени экспозиции 4 с на точку, в угловом диапазоне 2Ѳ = 10°-90° для исследования фазового состава покрытия. Образующиеся фазы в покрытии обозначены, как: орторомбическая – δ-Zr_3N_4, вюрцитные – w-$Zr_{0.5}Al_{0.5}N$, w-AlN и кубическая – c-$Zr_{0,5}Al_{0,5}N$ [4].

Сферический алмазный индентор типа Rockwell C с радиусом кривизны 600 мкм скретч-тестера REVETEST (CSM Instruments) перемещали по поверхности покрытия с непрерывно возрастающей нагрузкой на него от 1 Н до 70 Н для определения адгезионной прочности покрытий $Zr_{1-x}Al_xN$.

Акустическая эмиссия, коэффициент трения, глубина погружения индентора и нормальная нагрузка регистрировались в зависимости от нагрузки вдавливания. Для получения достоверных результатов на поверхность каждого покрытого образца наносилось по три царапины. Усло-

вия испытаний: скорость движения индентора, длина царапания и скорость отдачи составляли 5 мм/мин, 5 мм и 3 Н/с, соответственно.

Коэффициент трения μ, силу трения $F_{тр}$ и глубину погружения индентора P_d измеряли при различных постоянных нагрузках 18 Н, 36 Н, 54 Н и при критической нагрузке 70 Н, при которой происходит разрушение покрытия $Zr_{1-x}Al_xN$ до подложки. Адгезионную прочность оценивали по отношению силы нагружения на погружения индентора (F/P_d) в покрытие [5].

Дифрактограммы с участков покрытий $Zr_{1-x}Al_xN$, сформированных при различном напряжении смещения 100 В, 150 В, 200 В, изображены на рисунке 1. Фазовый состав покрытий $Zr_{1-x}Al_xN$ приведен в таблице 2.

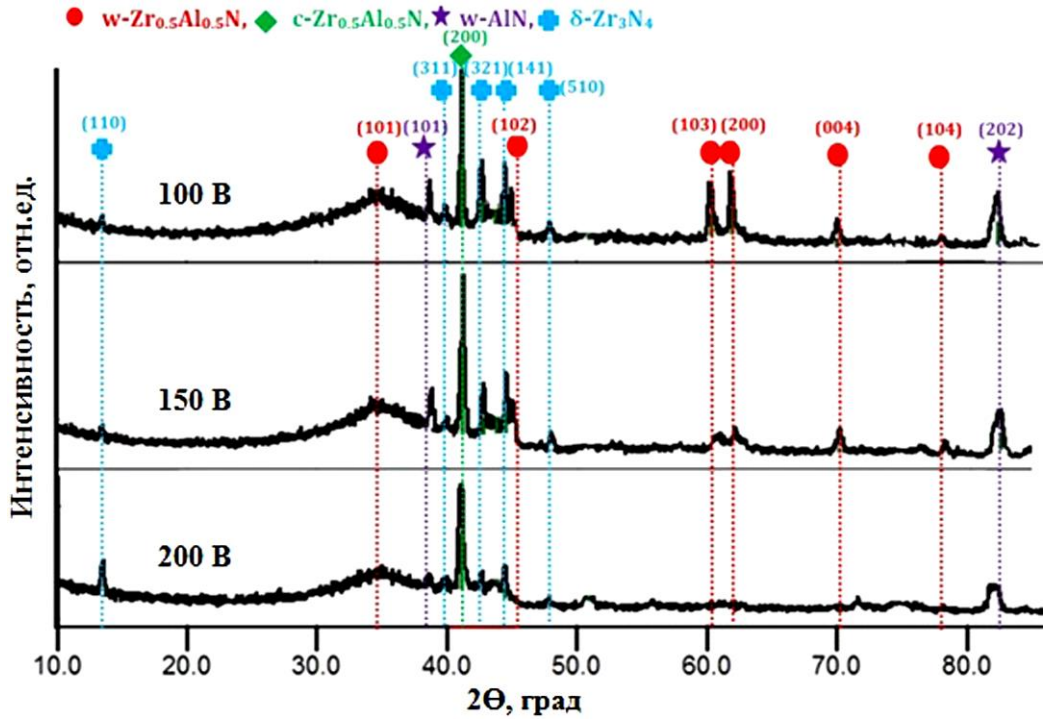


Рис. 1. Дифрактограммы с участков покрытий $Zr_{1-x}Al_xN$, сформированных при различном напряжении смещения 100 В, 150 В, 200 В.

Таблица 2

Фазовый состав покрытий $Zr_{1-x}Al_xN$

Номер покрытия	$U_{см}$, В	Объемные доли фаз (V), %				μ	$F_{тр}$, Н	F/P_d, Н/мкм
		w-$Zr_{0.5}Al_{0.5}N$	c-$Zr_{0.5}Al_{0.5}N$	δ-Zr_3N_4	w-AlN			
1	100	68,43	11,79	10,69	9,09	0,17	8	2,09
2	150	67,44	13,83	9,56	9,17	0,16	10	4,80
3	200	62,16	17,69	12,29	7,86	0,18	12	1,82

На основании рентгенофазового анализа и скретч-тестирования покрытий $Zr_{1-x}Al_xN$, сформированных при различном напряжении смещения, можно заключить, что минимальный коэффициент трения и высокая адгезионная прочность, оцениваемая по глубине погружения индентора, соот-

ветствуют покрытию 2 на основе трехкомпонентных фаз w-$Zr_{0.5}Al_{0.5}N$ и c-$Zr_{0,5}Al_{0,5}N$, при минимальной объемной доле двухкомпонентных фаз w-AlN и δ-Zr_3N_4. При увеличении объемной доли δ-Zr_3N_4 фазы повышается как коэффициент трения, так и уменьшается адгезионная прочность покрытий $Zr_{1-x}Al_xN$, что можно наблюдать по уменьшению отношения F/P_d.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wear behavior of ZrAlN coated cutting tools during turning / Rogström L, Johansson-Jõesaar M.P., Landälv L., Ahlgren M., Odén M. // Surface&Coatings Technology, 2015. No. 282. P. 180-187.

2. Microstructure and nanohardness properties of Zr–Al–N and Zr–Cr–N thin films / Lamni R., Sanjinés R., Parlinska-Wojtan M., Karimi A. and Lévy F. // J. Vac. Sci. Technol. A, 2005. Vol. 23, No. 4. P. 593-598.

3. Hasegawa H., Kawate M., Suzuki T. Effects of second metal contents on microstructure and micro-hardness of ternary nitride films synthesized by cathodic arc method. Surf.Coat.Technol., 2005. – No. 200. P. 2409-2013.

4. Зависимость трибологических свойств $Zr_{1-x}Al_xN$ покрытия от его элементного и фазового состава / Каменева А.Л., Клочков А.Ю., Гилев В.Г., Каменева Н.В., Сушенцов Н.И., Степанов С.А. // Конструкции из композиционных материалов. 2020. № 1. P. 58-63.

5. Каменева А.Л., Клочков А.Ю. Роль фазовых превращений в покрытиях $Zr_{1-x}Al_xN$ в формировании их трибологических свойств // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2023. Т. 25. № 4. P. 62-70.

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ПОЛИАНИЛИНА И УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В ГИБРИДНЫХ ПЛЕНКАХ

Т.Я. Каратышова, О.А. Хассун, В.Н. Миронюк, Е.Г. Глуховской
Научный руководитель: к.ф.-м.н. Глуховской Е.Г.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов

Аннотация. *Данная статья представляет собой исследование синергетического взаимодействия между полианилином и углеродными нанотрубками в пленках. Полианилин, как проводящий полимер, и углеродные нанотрубки, как наноматериалы с высокой электропроводностью и механической прочностью, объединяются в пленках для создания уникальных свойств. Исследования показывают, что сочетание полианилина и углеродных нанотрубок в пленках приводит к улучшению электропроводности, механических свойств и стабильности материала. Синергетический*

эффект между этими компонентами открывает новые перспективы для создания функциональных материалов в области электроники, энергетики и сенсорики. Статья представляет важные результаты исследований формирования ленгмюровских пленок, которые могут быть применены для разработки новых материалов с улучшенными свойствами и потенциалом для широкого спектра применений в современных технологиях.

Ключевые слова: *редокс-полимеры, проводящие полимеры, полианилин, углеродные нанотрубки, технология Ленгмюра, пленки Ленгмюра, морфология поверхности*

На основе полианилина (ПАНИ) разрабатываются различные электронные устройства, в том числе датчики, топливные и энергосберегающие элементы и солнечные панели. В этих устройствах ПАНИ используется в виде тонкого слоя на подложке толщиной от субмикронных до наноразмерных размеров. Органический полупроводниковый слой комбинируется с различными материалами в зависимости от типа устройства и имеет различную морфологию [1].

В статье рассматриваются два метода создания гибридных материалов на основе углеродных нанотрубок (УНТ) и полианилина с использованием метода Ленгмюра-Блоджетт. Первый метод заключается в формировании пленок из смеси УНТ и ПАНИ. Второй метод предполагает создание слоистой структуры, в которой слои УНТ чередуются со слоями ПАНИ. Морфология этих пленок была изучена с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Были приготовлены стабилизированные коллоидные растворы углеродных нанотрубок (CTI Materials, США) и УНТ/ПАНИ был получен химическим путём прямым окислением анилина с использованием известного метода [2] в форме эмеральдиновой соли) в н-метилпирролидоне (НМП). Концентрация УНТ составляла 0,0012 мг/мл, концентрация ПАНИ – 0,01 мг/мл. Для формирования монослоёв подготавливали смеси ПАНИ и арахиновой кислоты (от Sigma-Aldrich, содержание основного вещества >99,9 %), в концентрации 0,001 М в хлороформе (марки Victon, Россия) и УНТ и арахиновой кислоты в различных пропорциях.

Слои были сформированы на поверхности водной субфазы с использованием метода Ленгмюра–Блоджетт [3, 4]. Затем эти слои были перенесены на стеклянные подложки с использованием метода Ленгмюра–Шефера для последующего анализа. После этого образцы подвергались сушке в течение 10 минут при температуре от 80 до 90 °C.

Морфология поверхности образцов была исследована с помощью атомно-силового микроскопа, в частности, модели Solver P47 фирмы NT-MDT. На основе данных, полученных с помощью АСМ, была измерена толщина полученных пленок и исследовано влияние различных методов создания гибридных структур, включающих углеродные нанотрубки

(УНТ). Пленки, полученные из комбинации УНТ и ПАНИ, обладали отличными морфологическими характеристиками и пористостью по сравнению с пленками, сформированными с использованием послойного подхода. На основе анализа АСМ-изображений было предложено всестороннее качественное описание процессов, происходящих в пленках УНТ/ПАНИ.

Таким образом, сочетание емкостных характеристик углеродных нанотрубок и псевдоемкостных свойств ПАНИ приводит к созданию гибридных материалов, которые демонстрируют замечательные характеристики в широком спектре применений, включая высокоэффективные фотокаталитические системы, аккумуляторы, солнечные элементы и другие передовые устройства, улучшаются электрические свойства, происходит усиление механических свойств, увеличение поверхностной области, а также создание функциональных стабильных и устойчивых материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шишов М.А. Наноструктуры олиго- и полианилина и их свойства // Физика и химия стекла. 2010. № 37 (1). С. 147-154.

2. Kim B.J. Synthesis and characterization of polyaniline nanoparticles in sds micellar solutions // Synthetic metals. 2001. № 22 (2). P. 297-304.

3. Blodgett K.B. Films built by depositing successive monomolecular layers on a solid surface // J. Amer. Chem. 1935. Soc. 57. P. 1007-1022.

4. Formation of conductive layers based on carbon nanotubes by the Langmuir method / O.A.H. Hassoon, O.N. Salman, T.Ya. Karatyshova [et al.] // Journal of Advanced Materials and Technologies. 2025. № 10 (1). P. 8-18.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА РЕГРЕССИИ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ КОРРЕЛЯЦИИ ДЛЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ

Каунг Кхант Аунг
Научный руководитель: Захаров О.В.

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва

Аннотация. *Представлен новый подход к выбору типа регрессионной зависимости по коэффициенту корреляции Пирсона. Показано, что в первом приближении можно выбрать линейную, нелинейную или множественную регрессию. Сравнение типов регрессии выполнено методом наименьших квадратов. Приведен пример расчетов для параметров шероховатости образца после доводки.*

Ключевые слова: *шероховатость, корреляция, регрессия*

Шероховатость поверхности оценивается числом параметров более двадцати. В настоящее время недостаточно данных для нормирование всех параметров при различных видах обработки [1-3]. Поэтому актуальна задача выявления корреляции между параметрами и определение минимального набора параметров шероховатости. Исследований, посвященных корреляции параметров шероховатости, немного [4-6]. Большая часть из них решает задачу установления связи параметров с инструментом, режимами резания, вибрациями. Подробно вопрос корреляции рассмотрен только в работе [7].

В настоящей статье предлагается новый подход к уменьшению числа нормируемых параметров шероховатости на основе установления регрессионных зависимостей. Для этого выполняется расчет попарных коэффициентов корреляции Пирсона. В зависимости от полученного значения принимается решение о типе регрессии: линейная, нелинейная, множественная. После расчета параметров регрессионных зависимостей выполняется проверка методом наименьших квадратов.

Рассчитаны коэффициенты линейной корреляции между сочетаниями десяти параметров шероховатости, которые сведены в матрицу корреляции (рис. 1).

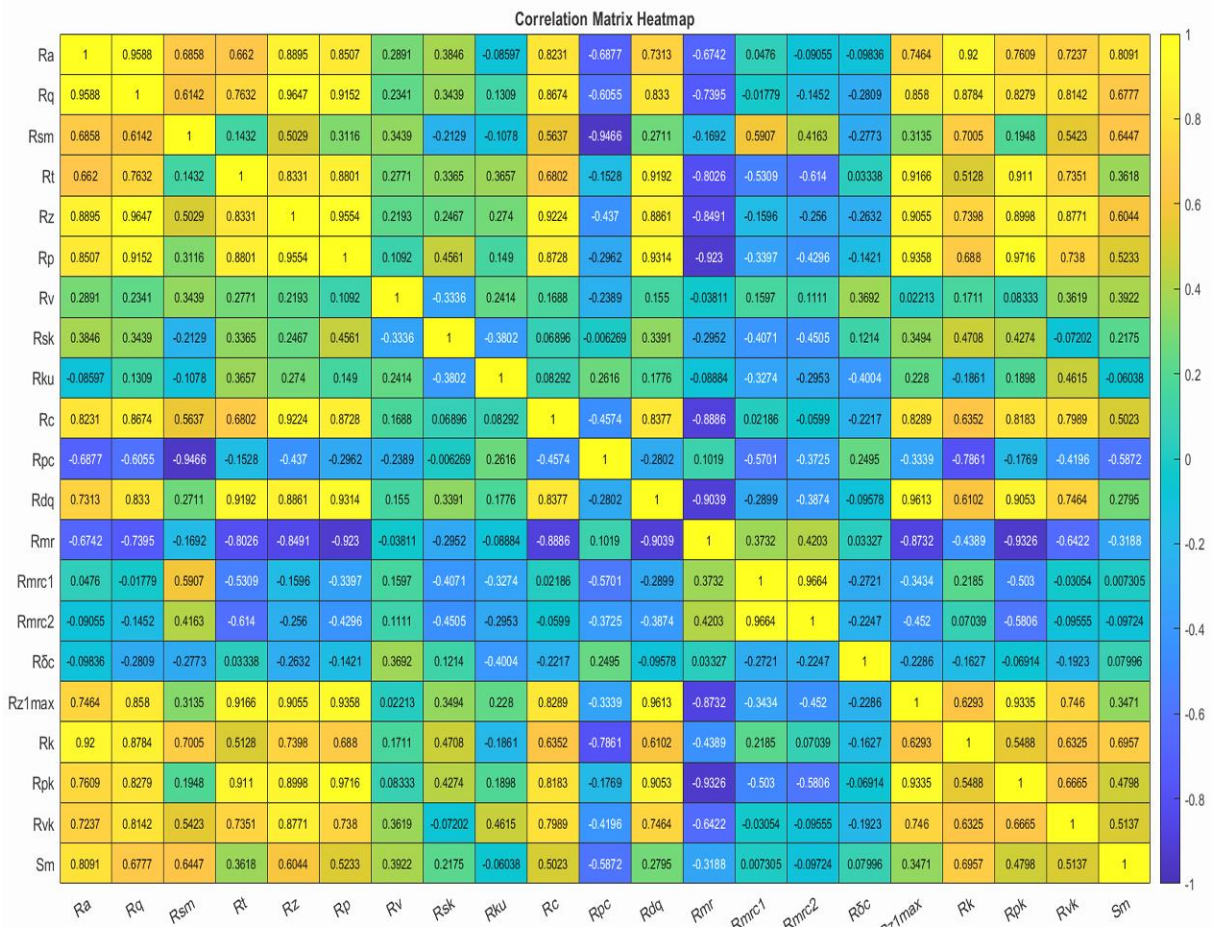


Рис. 1. Матрица корреляции параметров шероховатости при доводке

Анализ матрицы корреляции показал, что из 45 возможных сочетаний параметров имеется сильная корреляция (более 0,7) между 17 параметрами шероховатости. В подавляющем большинстве сочетаний имеется положительная корреляция.

На основании анализа экспериментальных данных и литературных источников предлагается использовать три типа регрессионных зажимистей: линейная, нелинейная и множественная. При значении коэффициента корреляции менее 0,3 корреляция считается слабой и построение регрессии нецелесообразно.

При значении коэффициента корреляции более 0,8 корреляция считается сильной и имеет место линейная зависимость. Для некоторых пар параметров коэффициент находится в пределах от 0,3 до 0,8, что указывает на возможность как нелинейной, так и множественной регрессии. Для подтверждения этого были проведены расчёты трёх типов регрессий:

• линейной единичной регрессии

$$y = a + bx,$$

• нелинейной степенной регрессии

$$y = a + bx_1 + cx_2^2,$$

• множественной линейной регрессии

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \cdots + b_nx_n.$$

Для множественной регрессии выполнены проверки статистической значимости коэффициентов регрессии и автокорреляции остатков. Данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	t-статистика	Статистика DW
const	1,391	2,51
x1 (Rdq)	0,0448	
x2 (Rz1max)	0,0736	
x3 (Rpk)	0,818	
x4 (Rvk)	1,055	

Для всех моделей была рассчитана сумма квадратов отклонений:

$$\boldsymbol{F = \sum_{i=1}^{n} (y1 - yi)^2 \rightarrow min.}$$

Как видно из табл. 2, множественная регрессия даёт наименьшее значение целевой функции, что подтверждает, что в данном случае [0,3 < r < 0,8] именно множественная регрессия даёт наилучшее приближение.

Таблица 2

Вид регрессии	Уравнение регрессии	*F*
Линейная	$R_a = 0{,}0062 + 0{,}2751R_q$	$1{,}26 \cdot 10^{-5}$
Нелинейная	$R_a = 0{,}0014 + 0{,}00055R_{sm} - 9{,}4{,}10^{-6}R_{sm}^2$	$1{,}19 \cdot 10^{-5}$
Множественная	$R_a = 0{,}00515 - 0{,}06898R_{dq} - 0{,}00754R_{z1max} + 0{,}2087R_{pk} + 0{,}1712R_{vk}$	$7 \cdot 10^{-6}$

Предложенный подход заключается в анализе коэффициентов корреляции и последующем выборе типа регрессии. В данном исследовании был выбран параметр шероховатости поверхности Ra как функции от других параметров шероховатости при доводке.

В результате построена модель множественной линейной регрессии. Используя сумму квадратов отклонений в качестве критерия сравнения, было показано, что в диапазоне коэффициентов корреляции $0{,}3 < r < 0{,}8$ модель множественной регрессии стабильно обеспечивает наилучшее приближение. Это подтверждает гипотезу о том, что при умеренной корреляции множественная регрессия более точна, чем линейная или нелинейная регрессия по одному параметру.

Данный подход может быть использован для выбора оптимального типа регрессии при анализе параметров шероховатости поверхности и других инженерных характеристик.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Whitehouse D.J. Surfaces and Their Measurement. Elsevier Ltd, 2004. 432 p.

2. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт: СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 136 с.

3. Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Суслова. Москва: Машиностроение, 2008. 320 с.

4. Кононогов С.А., Лысенко В.Г. Научно-методические основы 3D-метрии шероховатости поверхности: учеб. пособие. Москва: АСМС, 2010. 236 с.

5. Применение фильтров серии ISO 16610 для анализа структуры поверхности. Часть 4. Профильные сплайн и вейвлет-фильтры / О.В. Захаров, А.С. Яковишин, Ф.Д. Сулейманова, А.В. Жуков // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2023. № 1. С. 43-58.

6. Захаров О.В., Трошин А.А. Анализ корреляции функциональных параметров текстуры поверхности // Актуальные проблемы в машиностроении. 2021. Т. 8. № 3-4. С. 63-67.

7. Захаров О.В., Сулейманова Ф.Д. Линейные регрессионные зависимости для определения параметров шероховатости обработанных поверхностей. Ч. 1. Точение, торцевое фрезерование, плоское шлифование, полирование // Вестник машиностроения. 2024. Т. 103. № 4. С. 317-323.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ НА СВОЙСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ ПОКРЫТИЙ

И.В. Киселев, А.О. Кривенков, А.Г. Душинов

Пензенский государственный университет, г. Пенза

Аннотация. *На основе проведенных экспериментов по получению микродугового оксидирование МДО покрытия при различных параметрах была выявлена зависимость получаемых свойств от исходных параметров. Проведен ряд опытов при различных параметрах, изучена толщина, пористость и структура полученного покрытия.*

Ключевые слова: *анодирование, микродуговое оксидирование, покрытия*

Введение

В проводимых экспериментах по получени оксидного слоя путем МДО в качестве электролитов использовали комбинированные растворы: щелочи и жидкого стекла, состав которого представлен в табл. 1, режимы представлены в табл. 2.

Таблица 1

Применяемые параметры оксидирования

Электролит	Время обработки τ, мин	Концентрация компонентов электролита, г/л	
		Na_2SiO_3	KOH
Силикатно-щелочной	5…20	7…8	5…8

Исследование влияния параметров МДО на толщину и пористость оксидных слоев на алюминии

В ходе исследований было установлено, что различные значения базовых характеристик МДО оказывают влияние на толщину и пористость оксидных слоев на алюминии В95 получены частные зависимости, представленные на рис. 1.

В процессе исследований в области щелочно-силикатного электролита было определено оптимальное содержание компонентов: 5 г/л гидроксида калия и 7 г/л жидкого стекла [1-5].

Таблица 2

Исходные данные для обработки образцов
в силикатно-щелочном электролите

Вариант обработки		Номер образца			
		1	2	3	4
I	j, А/дм^2 ± 0,01	10	20	30	40
	T, ^{o}C ± 0,5	20	20	20	20
	τ, мин	30	30	30	30
II	j, А/дм^2 ± 0,01	20	20	20	20
	T, ^{o}C ± 0,5	20	20	20	20
	τ, мин	10	20	30	40
III	j, А/дм^2 ± 0,01	20	20	20	20
	T, ^{o}C ± 0,5	10	20	30	40
	τ, мин	30	30	30	30

На рисунке 1а мы видим увеличение оксидного слоя от 40 мкм при плотности тока 10 А/дм^2 до 130 мкм при 40 А/дм^2. Тем не менее при росте толщины оксидного слоя при высокой плотности оксидные слои достигают определенной толщины, при достижении которого происходит изменение дуги в сторону увеличения ее разрушающей силы.

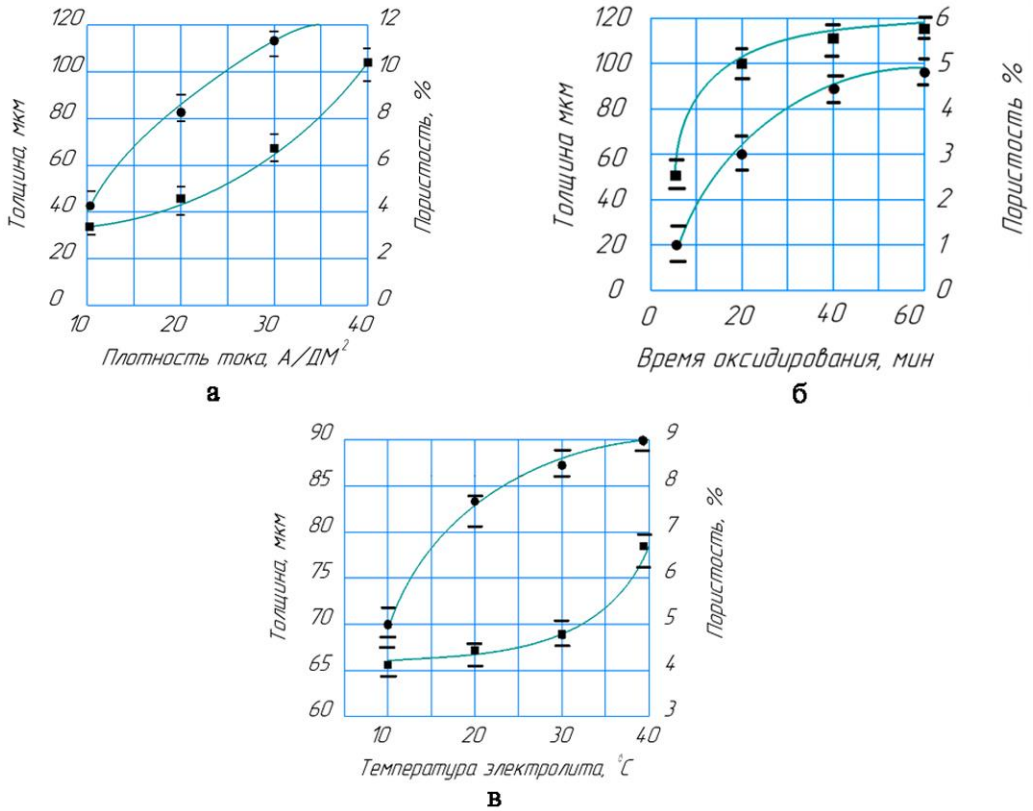
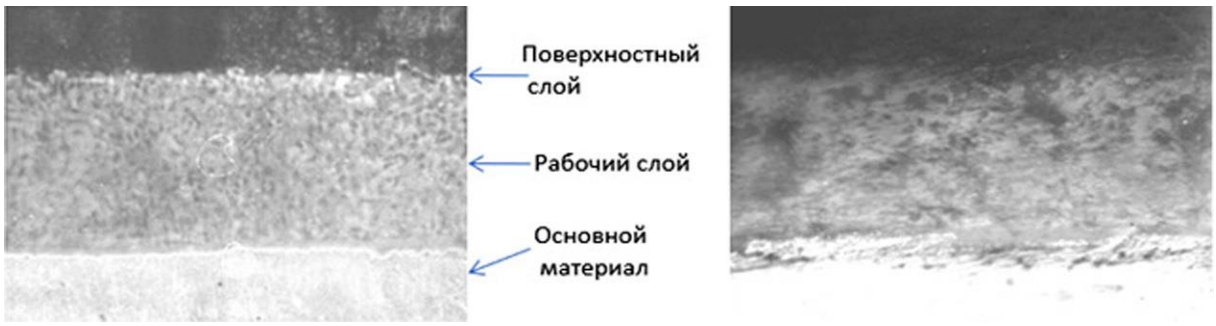


Рис. 1. Зависимости толщины и пористости оксидных слоев от параметров оксидирования в силикатно-щелочном электролите ●—●—● толщина, ■—■—■ пористость:
а – в зависимости от плотности электрического тока;
б – в зависимости от продолжительности оксидации;
в – в зависимости от температуры электролита

Наряду с этим наблюдается увеличение пористости на 4-10 %, что также связано с усилением разрушающего действия электрических разрядов при увеличении толщины. Увеличение пористости оксидного слоя в диапазоне от 25 до 40 А/дм^2 особенно заметно на рис. 2.

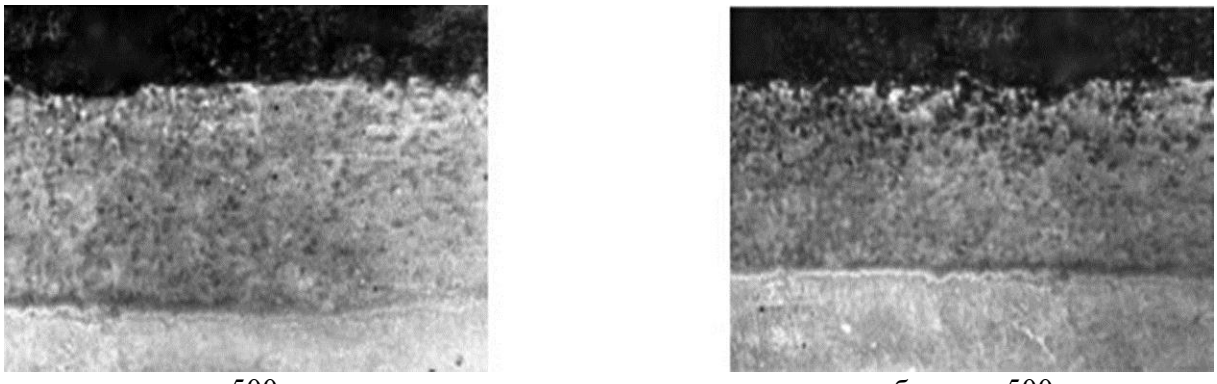
На рисунке 1 (в) видно аналогичное изменение пористости и толщины покрытия при различных температурах электролита. Из графика видно, что абсолютные значения и скорость роста значительно ниже в отличие от пористости. Таким образом, величина достигает 7 %. Данное изменение объясняется увеличением тока в микродуге из-за повышения температуры электролита, что влечет за собой повышение электропроводности. Это способствует разрушению поверхности оксидного слоя.

На изображении 2 представлены снимки поперечного сечения оксидного покрытия, демонстрирующие степень пористости, полученной в процессе электролиза при различных температурах. На изображении 3 (б) четко просматриваются поверхностные ямки окисного происхождения, образовавшиеся на последнем этапе формирования покрытия с высокой температурой.



а ×500 б ×500

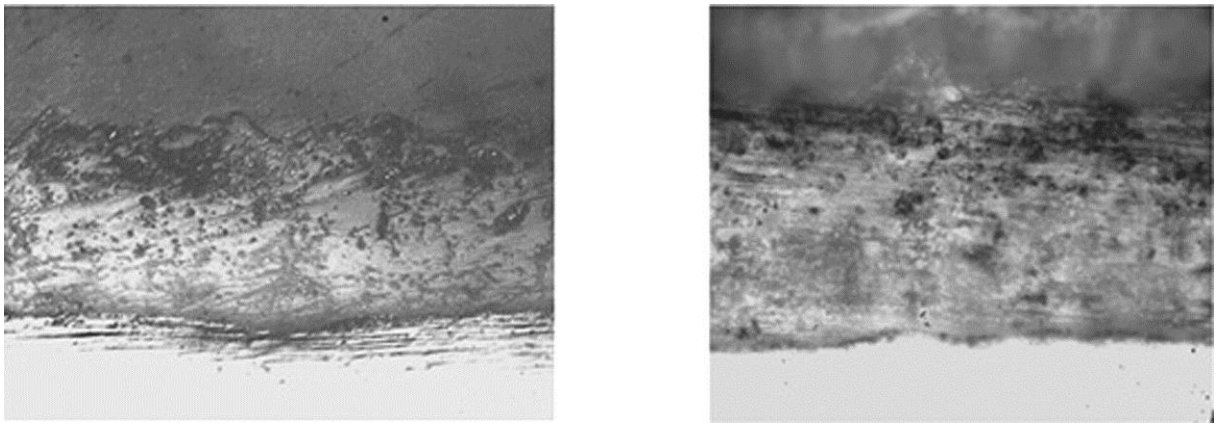
Рис. 2. Пористость оксидного слоя, полученного в силикатно-щелочном электролите при различных плотностях электрического тока:
а – плотность тока 10 А/дм^2, б – плотность тока 30 А/дм^2



а ×500 б ×500

Рис. 3. Пористость оксидного слоя, полученного в силикатно-щелочном электролите при различной температуре:
а – температура электролита 10 °С, б – температура электролита 40 °С

Экспериментальные исследования выявили нелинейную динамику роста оксидного слоя, где зависимость толщины от времени обработки подчиняется экспоненциальному закону. По мере формирования покрытия наблюдается выраженный эффект замедления скорости осаждения, обусловленный возрастающим сопротивлением уже сформированного оксидного барьера. Параллельно с этим процессом отмечается прогрессирующее увеличение пористости в характерном диапазоне 3,1-3,5 %, что имеет прямую корреляцию с продолжительностью обработки.



а ×300 б ×300

Рис. 4. Пористость оксидного слоя, полученного в силикатно-щелочном электролите, в зависимости от времени обработки: а – 10 мин, б – 40 мин

Заключение

Формирование равномерных покрытий с контролируемой толщиной возможно при использовании различных технологических подходов. Ключевым параметром в этом процессе выступает плотность тока, которая находится в обратно пропорциональной зависимости от времени образования оксидного слоя. Такие различия в микроструктуре обусловлены комплексом факторов: во-первых, спецификой температурных режимов, определяющих кинетику растворения оксидной пленки; во-вторых, вариациями силы электрического тока, создающими уникальные условия электрохимического синтеза. Именно сочетание этих параметров формирует конечные эксплуатационные характеристики каждого конкретного покрытия [6].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аверьянов Е.Е. Справочник по анодированию: справочник специалиста. Москва: Машиностроение, 1988. – 224 с.

2. Холодов Ю.А. Микродуговое оксидирование. Наука и человечество: Международный ежегодник. Москва: Знание, 1981. С. 341-342.

3. Артемова С.Ю. Формирование микроплазменными методами защитных оксидных покрытий из водных электролитов различного химиче-

ского состава и степени дисперсности автореф. дис. ... канд. техн. наук / 05.17.14 / Моск. ин-т стали и сплавов. Москва, 1996. 22 с.

4. Хрисанфова О.А., Гордиенко П.С. Влияние ионного состава электролита и режима оксидирования на фазовый и элементный состав покрытий, полученных на металлах / ДВО АН СССР. Ин-т химии. Владивосток. 1989. 70 с. Рук. деп. в ВИНИТИ 6.05.89. № 2986-889.

5. Снежко Л.А. Получение анодных покрытий в условиях искрового разряда и механизм их образования: автореф. дис. … канд. хим. наук. Днепропетровск, 1982. 16 с.

6. Ханина Е.Я., Одынец Л.Л. Физика окисных пленок. Петрозаводск: Изд-во ПГУ, 1979. Ч. I – 80 с; 1981. Ч. II – 74 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЖИДКОФАЗНОГО ПЕРОКСИДНОГО ОКИСЛЕНИЯ ФЕНОЛА В ПРИСУТСТВИИ КАТАЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ ПИЛЛАРИРОВАННЫХ ГЛИН

Т.Б. Медведева[1,2], А.С. Клочихина[2], В.Н. Панченко[1,2],
М.Н. Тимофеева[1,2], Н.В. Громов[1,2]
Научный руководитель: м.н.с. Медведева Т.Б.,
к.х.н., доцент Громов Н.В.

[1]Институт катализа им. Борескова СО РАН, г. Новосибирск
[2]Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

Аннотация. *В работе исследован процесс жидкофазного пероксидного окисления фенола в присутствии катализаторов на основе пилларированных глин Al_nFe_m-PILC (где n = 11,12; m = 1,2). Наибольшей активностью в процессе обладает катализатор $Al_{12}Fe$-PILC (7 дней) (конверсию фенола – 100 %, минерализация – 54 %). В присутствии катализатора $Al_{12}Fe$-PILC (7 дней) были подобраны оптимальные условия ([катализатор] – 1,5 г/л, [субстрат]/[окислитель] – 1/20, pH – естественный (5,5). При подобранных условиях конверсия фенола достигает 100 % за 1 ч, а минерализация – 63 %.*

Ключевые слова: *сточные воды, гетерогенный катализатор, экотоксикант, фенол, пероксидное жидкофазное окисление, пилларированные глины*

Фенол представляет опасность для водных экосистем и здоровья человека, его концентрация не должна превышать 0,001 мг/л в питьевой воде (СанПиН 1.2.3685-21). Традиционные методы очистки не обеспечи-

вают полного удаления фенола из сточных вод, поэтому требуется их доочистка, например каталитическим жидкофазным пероксидным окислением. Для эффективного осуществления данного процесса необходим поиск эффективных твердых катализаторов. В данной работе предложено проводить процесс в присутствии модифицированных пилларированных природных глин.

Каталитические материалы были синтезированы на основе природных слоистых алюмосиликатов (монтморелонит 95 % (Казахстан)). Приготовление катализаторов проводили внедрением Fe,Al-гидроксокатионов, сформированных в течение 7 или 14 дней из растворов нитратов Fe и Al и NaOH, в межслоевое пространство в течение 24 ч с последующим прокаливанием образцов 4 ч при 400 °C. Синтезировано 4 образца Al_nFe_m-PILC (где n – 11,12; m – 1,2), которые отличались соотношением Al и Fe, а также временем формирования гидроксокатиона.

Текстурные характеристики были изучены низкотемпературной адсорбцией азота. Так, для исходного бентонита значение удельной площади поверхности составило 50 $м^2/г$, объем микропор – 0,0026 $см^3/г$, диаметр пор – 81 Å. Пилларирование глины приводит к увеличению $S_{уд}$ до 80 $м^2/г$ и росту суммарного объема микропор в 3-76 раз по сравнению с исходной глиной. При модификации глины наблюдается увеличению межслоевого расстояния (d001) с 12 до 17-18 Å.

Жидкофазное пероксидное окисление фенола изучено в термостатируемом стеклянном реакторе при 40-70 °C с контролем pH. Начальное содержание фенола составляло 0,006 М, катализатора – 1-2 г/л, pH = 5-5,7. Мольное соотношение субстрата к окислителю варьировалось от 1/8 до 1/26 (стехиометрическое соотношение – 1/14). Влияние начального pH реакционной смеси на окислительную деструкцию фенола дополнительно изучено при значениях 3 или 9.

Состав реакционных смесей в процессе реакции изучался методом ВЭЖХ, контролировалось содержание общего органического углерода [1]. Расход пероксида водорода определяли спектрофотометрически по образованию окрашенного комплекса H_2O_2 с раствором $TiCl_4$ [1].

Испытания всех катализаторов Al_nFe_m-PILC проводили при 50 °C, стехиометрическом соотношении $PhOH/H_2O_2$, равном 1/14, и загрузке катализатора 1 г/л. Немодифицированный бентонит не был активен в окислении фенола. Конверсия фенола в присутствии модифицированных глин достигала 93-100 %. Каталитическая активность возрастала в ряду $Al_{11}Fe_2$-PILC (14 дней) < $Al_{12}Fe$-PILC (14 дней) < $Al_{11}Fe_2$-PILC (7 дней) < $Al_{12}Fe$-PILC (7 дней).

В присутствии наиболее активного катализатора $Al_{12}Fe$-PILC (7 дней) полное превращение фенола достигается за 240 мин, а степень минерализация составляет 54 %. В ходе реакции pH раствора снижался в следствие образования органических кислот (обнаружены муравьиная, уксусная, гли-

колевая и молочная кислоты в количестве до 23 % (в пересчете на остаточное количество ООУ)).

В присутствии катализатора $Al_{12}Fe$-PILC (7 дней) изучены влияние температуры, соотношения субстрат/окислитель, загрузки катализатора и pH реакционной среды на эффективность процесса. Так, увеличение температуры с 40 °C до 70 °C ([катализатор] – 1 г/л, [PhOH]/[H_2O_2] – 1/14) приводит к увеличению степени минерализации до 74 %. На основании экспериментальных данных была рассчитана энергия активации, которая составила 72 ± 12 кДж/моль.

При изучении влияния загрузки окислителя показано, что уменьшение концентрации пероксида водорода с 0,084 до 0,048 М ([PhOH]/[H_2O_2] – 1/8, 50 °C, [катализатор] – 1 г/л) приводит к снижению скорости окисления фенола и значения степени минерализации до 32 %. При увеличении концентрации пероксида водорода до 0,12М ([PhOH]/[H_2O_2] – 1/20) наблюдается полная конверсия фенола за 1 ч, при сохранении степени минерализации 54 %. Изучение влияния загрузки катализатора показало ([PhOH]/[H_2O_2] – 1/20, 50 °C), что увеличение концентрации катализатора с 1 до 1,5 г/л приводит как к увеличению начальной скорость, так и минерализации (до 63 %). Загрузка $Al_{12}Fe$-PILC (7 дней), равная 2 г/л, не оказывает влияния процесс. Загрузка катализатора 1,5 г/л выбрана как оптимальная.

При изучении влияния pH реакционной среды было показано ([PhOH]/[H_2O_2] – 1/20, 50° C, [катализатор] – 1,5 г/л), что в кислой среде наблюдается увеличение скорости превращения экотоксиканта. Однако глубина деструкции фенола была сопоставима со значениями, полученными при pH реакционной среды, равной 6 (минерализация – 63%). Проведение эксперимента в щелочной среде (pH = 9) привело к конверсии фенола, равной лишь 6 % за 5 ч.

Цикловые испытания катализатора $Al_{12}Fe$-PILC (7 дней) показало, что конверсия фенола в течение трех циклов составляет 100 %. Однако наблюдается снижение степени минерализации с 63 % в первом цикле до 29 % в третьем цикле.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного задания Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024-0036) и Новосибирского государственного технического университета (проект ТП-ИПЭ-1_25).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Liquid Phase Peroxide Oxidation of Phenol in the Presence of Catalysts Based on Mixed Oxides of Transition Metals and Cellulose / Perebeinos A.A., Mishchenko T.I., Gurovskii V.V., Medvedeva T.B., Yatsenko D.A., Gromov N.V. // Russian Journal of Applied Chemistry. 2024. V. 97. N 5. P. 486-499. DOI: 10.1134/S1070427224050021

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПРОВОЛОК ИЗ СПЛАВА Al-0.26Zr ПРИ КОМНАТНОЙ И ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А.В. Комельков, А.В. Нохрин, А.А. Бобров, А.Н. Сысоев,
Шишулин Е.О., Морозкина Е.О.
Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор Нохрин А.В.

Нижегородский Национальный исследовательский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

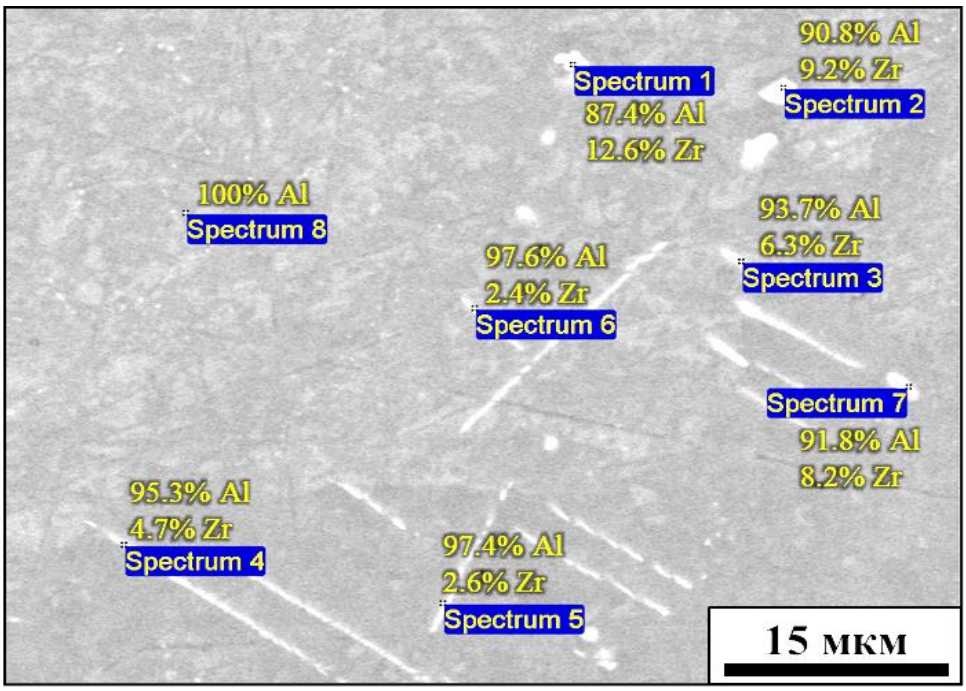
Аннотация. *Интенсивное развитие современных транспортных систем ставит перед исследователями-материаловедами задачу о разработке легких проводниковых материалов, обладающих повышенными механическими свойствами и термостойкостью, которые могут быть использованы в бортовой электросети высокоскоростного транспорта [1, 2]. Целью данной работы является исследование нового проводникового сплава Al-вес.% 0,26 Zr и тонкой проволоки из него, обладающей повышенными (для проводниковых сплавов) механическими свойствами и термической стабильностью зеренной структуры. Исследование свойств проволоки (проводимость, пластичность, предел прочности) проведено при комнатной и повышенных температурах. Свойства и микроструктура исследованы после испытаний на термостойкость по ГОСТ Р МЭК 62004-2014.*

Ключевые слова: *проволока, проводниковый сплав, термостойкость, Al-Zr, предел прочности, электропроводность, температурные испытания*

Проволока из чистого алюминия не обладает достаточной прочностью и термостабильностью для применения в высокотемпературной электротехнике, для улучшения свойств материала традиционно прибегают к микролегированию.

Одним из перспективных легирующих элементов для создания термостойких проводниковых алюминиевых сплавов является Zr [3, 4]. При нагреве сплавов системы Al-Zr происходит распад твердого раствора и выделение наночастиц Al_3Zr, обеспечивающих дисперсионное упрочнение и препятствующих движению границ зерен.

В данной работе исследовали свойства тонкой проволоки (∅ 0,3 мм) из сплава Al-0.26Zr. Слитки изготавливали методом литья с индукционным нагревом и перемешиванием, проволока получена методом ротационной ковки с последующим холодным волочением. В структуре сплава присутствуют первичные частицы Al_3Zr (рисунок) игольчатой формы.



Результаты энергодисперсионного рентгеновского
микроанализа сплава в растровом электронном микроскопе

В таблице приведены результаты измерения предела прочности (σ_B), относительного удлинения до разрушения (δ) и удельного электросопротивления (УЭС, ρ) проволоки при температурах 25, 100, 200, 300 °С. Измерения выполнены для проволоки в исходном состоянии (после волочения) и после 60-минутных отжигов при температурах 230, 280, 400 °С, которые в соответствии с ГОСТ Р МЭК 62004-2014 моделируют длительную выдержку при более низких температурах отжига (400 ч при 180, 240 и 310 °С или 350400 ч при 150, 210 и 230 °С соответственно).

Свойства проволоки при комнатной и повышенных температурах

Отжиг	σ_B, МПа	δ, %	ρ, мкОм·см
Испытания при 25° С			
Исходное состояние	203 ± 12	0,3 ± 0,3	3,21 ± 0,04
230 °С, 1 ч	178 ± 12	0,7 ± 0,5	3,02 ± 0,08
280 °С, 1 ч	138 ± 13	1,1 ± 0,2	3,16 ± 0,07
400 °С, 1 ч	110 ± 24	10,6 ± 10,4	3,17 ± 0,05
Испытания при 100° С			
Исходное состояние	160 ± 54	0,5 ± 0,7	4,24 ± 0,05
230 °С, 1 ч	181 ± 6	0,7 ± 0,4	3,98 ± 0,10
280 °С, 1 ч	136 ± 7	1,0 ± 1,1	4,02 ± 0,09
400 °С, 1 ч	89 ± 3	13,0 ± 0,6	4,05 ± 0,06
Испытания при 200° С			
Исходное состояние	146 ± 12	0,5 ± 0,1	5,34 ± 0,07
230 °С, 1 ч	109 ± 32	0,3 ± 0,2	5,10 ± 0,13
280 °С, 1 ч	113 ± 19	0,7 ± 0,5	5,13 ± 0,11
400 °С, 1 ч	61 ± 2	7,6 ± 1,7	5,16 ± 0,08

Окончание таблицы

Отжиг	σ_B, МПа	δ, %	ρ, мкОм·см
Испытания при 300° С			
Исходное состояние	89 ± 2	0,4 ± 0,2	6,42 ± 0,08
230 °С, 1 ч	99 ± 38	0,4 ± 0,2	6,17 ± 0,16
280 °С, 1 ч	83 ± 4	0,8 ± 0,6	6,27 ± 0,14
400 °С, 1 ч	47 ± 4	3,4 ± 1,8	6,31 ± 0,10

Проволока в исходном состоянии имеет σ_B около 200 МПа, УЭС – около 3.2 мкОм·см (σ_B аналогичной проволоки из алюминия А99 в 2 раза меньше). При 60-минутных отжигах происходит падение σ_B и возрастание δ, что обусловлено протеканием процессов возврата и рекристаллизации. Падение УЭС при этом, главным образом, связано с распадом твердого раствора и уменьшением концентрации Zr в растворенном состоянии. При повышенных температурах испытаний предел прочности и пластичность проволоки резко снижаются, УЭС возрастает. Снижение механических характеристик при нагреве, вероятно, связано с преждевременным обрывом проволоки на частицах, взаимодействующих с дислокациями по механизму Орована. При повышении температуры увеличивается подвижность дислокаций и активируются дополнительные плоскости скольжения. В процессе пластической деформации движущиеся дислокации огибают некогерентные частицы, образуя на них дислокационные петли. Постепенно количество таких петель на частицах увеличивается, и создаваемые ими поля упругих напряжений препятствуют движению других дислокаций. В итоге такие частицы становятся концентраторами напряжений, на которых происходит зарождение трещины, распространение которой приводит к разрушению образца. Чем выше температура испытания и, следовательно, подвижность дислокаций, тем быстрее образуются концентраторы и происходит разрыв проволоки. Возрастание УЭС обусловлено увеличением рассеяния электронов проводимости на фононах. Температурный коэффициент сопротивления α равен 4,0 $°C^{-1}$, что совпадает со значением для чистого Al.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 20-19-00672).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Телешов В.В., Захаров В.В., Запольская В.В. Развитие алюминиевых сплавов для термостойких проводов с повышенной прочностью и высокой удельной электропроводимостью // Технология легких сплавов. 2018. №1. С. 15-27.

2. Multifunctional properties of composition graded Al wires / Yang C., Masquellier N., Gandiolle C., Sauvage X. // Scripta Materialia. 2020. Vol. 189. P. 21-24.

3. Захаров В.В. О совместном легировании алюминиевых сплавов скандием и цирконием // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 6. С. 3-8.

4. Structure and properties of Al-0.6wt.%Zr wire alloy manufactured by direct drawing of electromagnetically cast wire rod / Belov N., Murashkin M., Korotkova N., Akopyan T., Timofeev V. // Metals. 2020. Vol. 10. Iss. 6. C. 769.

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКЕ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

В.Д. Оленин
Научный руководитель: Корольков А.О.

Пензенский колледж информационных и промышленных технологий (ИТ-колледж), г. Пенза

Аннотация. *Целью данной статьи является анализ современных и перспективных способов повышения стабильности горения дуги и обеспечения управляемого переноса электродного металла в сварочную ванну при механизированной сварке плавящимся электродом. Особое внимание уделяется применению импульсных технологий.*

Ключевые слова: *управляемый перенос металла, импульсные технологии, минимальный нагрев, сварка*

В различных отраслях промышленности широко применяются сварные конструкции, изготавливаемые из большого разнообразия материалов (сталь, алюминий, титан, композиционные материалы). Для получения качественных сварных конструкций толщиной от 1 до 8 мм, исключающих образование остаточных деформаций и дефектов необходимо обеспечить минимальное тепловложение в процессе переноса электродного металла. Для этих целей применятся механизированная импульсная сварка плавящимся электродом [1].

Проведён патентный поиск с ретроспективой 15 лет для выявления современных решений в механизированной импульсной сварке конструкций из углеродистых и легированных сталей, сплавов на основе алюминия, титана, биметаллических и многослойных материалов. Отобраны рефераты, патенты и научно-техническая информация. Определены направления, цели и задачи исследования. Ключевым результатом работы является выявление новых технологических решений и усовершенствованных дуговых способов сварки. Результаты поиска представлены в таблице [1-5].

Результаты патентного поиска

Заявитель (патентообладатель), номер заявки, страна, дата публикации	Название изобретения (полной модели, образца)
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU) № 2011128111/02, 07.07.2011	Способ механизированной сварки плавящимся электродом с наложением механических наноимпульсов на подачу сварочной проволоки
Федюкин Сергей Валентинович № 2015128444, 13.07.2015	Способ механизированной дуговой сварки с короткими замыканиями в среде инертных и защитных газов
ООО «РОМЕТ». – № PCT/RU2016/000093; заявл. 19.02.2016	Способ сварки изделия из коррозионностойких многослойных металлических материалов
Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации (Минпромторг России) № 2013142390/02, 17.09.2013	Способ импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов
Российская Федерация, от имени которой выступает Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» (Госкорпорация «Росатом») № 2021131214, 25.10.2021	Способ импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом алюминиево-магниевого сплава

Патентный анализ подтверждает эффективность импульсной дуговой сварки из-за снижения тепловложения в сварочную ванну. Это особенно важно при работе с легированными и теплоустойчивыми сталями (для предотвращения перегрева) и многослойными материалами (для предотвращения перемешивания слоев).

Импульсный режим обеспечивает контролируемый перенос металла, уменьшает разбрызгивание и риск образования дефектов. Сейчас ведутся разработки в области импульсной сварки с механическими колебаниями проволоки для еще более точного контроля переноса электродного металла.

Импульсная сварка работает по принципу чередования дежурного тока и импульсов для формирования капли и ее контролируемого переноса в сварочную ванну с последующим охлаждением и кристаллизацией.

Использование сварочной смеси Кронигон-2 (97,5 % Ar_2 + 2,5 % CO_2) в качестве защитной среды позволяет добиться более плавного переноса капли металла в сварочную ванну с минимальным количеством брызг.

Современные сварочные полуавтоматы позволяют работать в двух режимах – одиночный (Pulse) и двойной импульсы (Double Pulse):

Отличие двойного импульса от одинарного является использование дополнительных импульсов, что позволяет более эффективно контролировать нагрев основного и перенос электродного металла.

На основе импульсного режима была разработана ускоренная сварка концентрированной дугой с глубоким проплавлением в узкую разделку (вылет проволоки 25 мм). Такой способ используется для толстых высоколегированных, низкоуглеродистых и высокопрочных сталей. Благодаря узкой разделке количество проходов сокращается и скорость сварки увеличивается.

Анализ научно-технической литературы и патентных источников свидетельствует об интенсивных исследованиях в области механизированной сварки плавящимся электродом с применением импульсной дуги. Использование импульсных технологий открывает широкие перспективы для улучшения процесса сварки, а именно: снижение тепловложения, уменьшение перемешивания слоев при сварке композитов, минимизация разбрызгивания металла, повышение качества шва и снижение вероятности образования дефектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Способ механизированной сварки плавящимся электродом с наложением механических наноимпульсов на подачу сварочной проволоки: пат. 2481931, Рос. Федерация: МПК B23K 9/173 / Брунов О.Г., Солодский С.А., Зеленковский А.А. [и др.]; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». № 2011128111/02; заявл. 07.07. 2011; опубл. 20.05.2013, Бюл. № 12. 5 с: ил.

2. Способ механизированной дуговой сварки с короткими замыканиями в среде инертных и защитных газов: пат. 2613247, Рос. Федерация: B23K 9/09 / Федюкин С.В.; заявитель и патентообладатель Федюкин С.В. – № 2015128444; заявл. 13.07.2015; опубл. 17.01.2017, Бюл. № 2. 16 с: ил.

3. Способ сварки изделия из коррозионностойких многослойных металлических материалов: пат. WO 2017/142435 A1, Рос. Федерация: B23K 9/23, B23K 33/00, B35K 9/24 / Розен А.А., Розен А.Е., Грачев В.А.; заявитель и патентообладатель ООО «РОМЕТ». № PCT/RU2016/000093; заявл. 19.02.2016; опубл. 24.08.2017. 32 с: ил.

4. Способ импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов: пат. 2553769 C2, Рос. Федерация: B23K 9/09 / Зыков С.А., Павлова В.И.; заявитель и патентообладатель Министерство промышленности и торговли Российской Федерации № 2013142390/02; заявл. 17.09.2013; опубл. 10.04.2015. 9 с: ил.

5. Способ импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом алюминиево-магниевого сплава: пат. 2789951 С1, Рос. Федерация: МПК B23K 33/00 / Бельков С.А.; заявитель и патентообладатель ГК «Росатом» № 2021131214; заявл. 25.10.2021; опубл. 14.02.2023. 13 с.

6. Введение в мир инновационной импульсной сварки. URL: https://www.ventsvar.ru/reviews/osnovy_impulsnogo_rezhima_svarki.html (дата обращения 12.05.25).

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ЗАХВАТА И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ АККУМУЛЯТОРА ДЛЯ СТАНЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАМЕНЫ АКБ БПЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ 3-D ПЕЧАТИ

Д.В. Кривоножкин
Научный руководитель: Тимофеев М.Н.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В статье рассказывается о макетировании устройства захвата и перемещения аккумулятора беспилотного летального аппарата с применением аддитивных технологий.*

Ключевые слова: *аддитивные технологии, макетирование, беспилотные технологии*

Аддитивные технологии представляют собой инновационный подход к производству, который радикально меняет традиционные методы разработки изделий. Эти технологии позволяют формировать детали с высокой точностью и возможностью создания сложных геометрических форм [3], [6]. В последнее время аддитивные технологии находят применение в различных отраслях, включая аэрокосмическую, автомобильную и медицинскую, благодаря своей способности ускорять процесс разработки и сокращать затраты на производство.

Одной из сфер, где аддитивные технологии показывают свой потенциал, являются беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Дроны с каждым днем становятся все популярнее в самых различных областях – от простого развлечения до доставки посылок на дом [5].

На данный момент БПЛА уже обучили: анализировать местность, автоматически вылетать на разведку территории, вести мониторинг трубопроводов, автодорог и возвращаться на свою базу обратно [4]. Однако человек до сих пор нужен для обслуживания БПЛА, и чтобы увеличить рациональное использование человеческих ресурсов для выполнения других задач, было решено найти методы полностью автоматизировать процесс.

Одни из самых распространенных устройств – станции с манипулятором [1]; такие системы хоть и решают большое количество задач, однако они не являются удовлетворительными из-за высокой стоимости.

Целью данной работы является разработка узла захвата аккумуляторных батарей для БПЛА и проверка механизма при помощи аддитивных технологий.

Разработка узла захвата аккумуляторных батарей для беспилотных летальных аппаратов

В рамках создания станции по автоматической замене АКБ БПЛА необходимо разработать и провести испытания узла, который будет осуществлять захват АКБ для монтажа/демонтажа из БПЛА с высокой точностью.

В ходе разработки была создана конструкция, позволяющая осуществить захват с последующим перемещением АКБ.

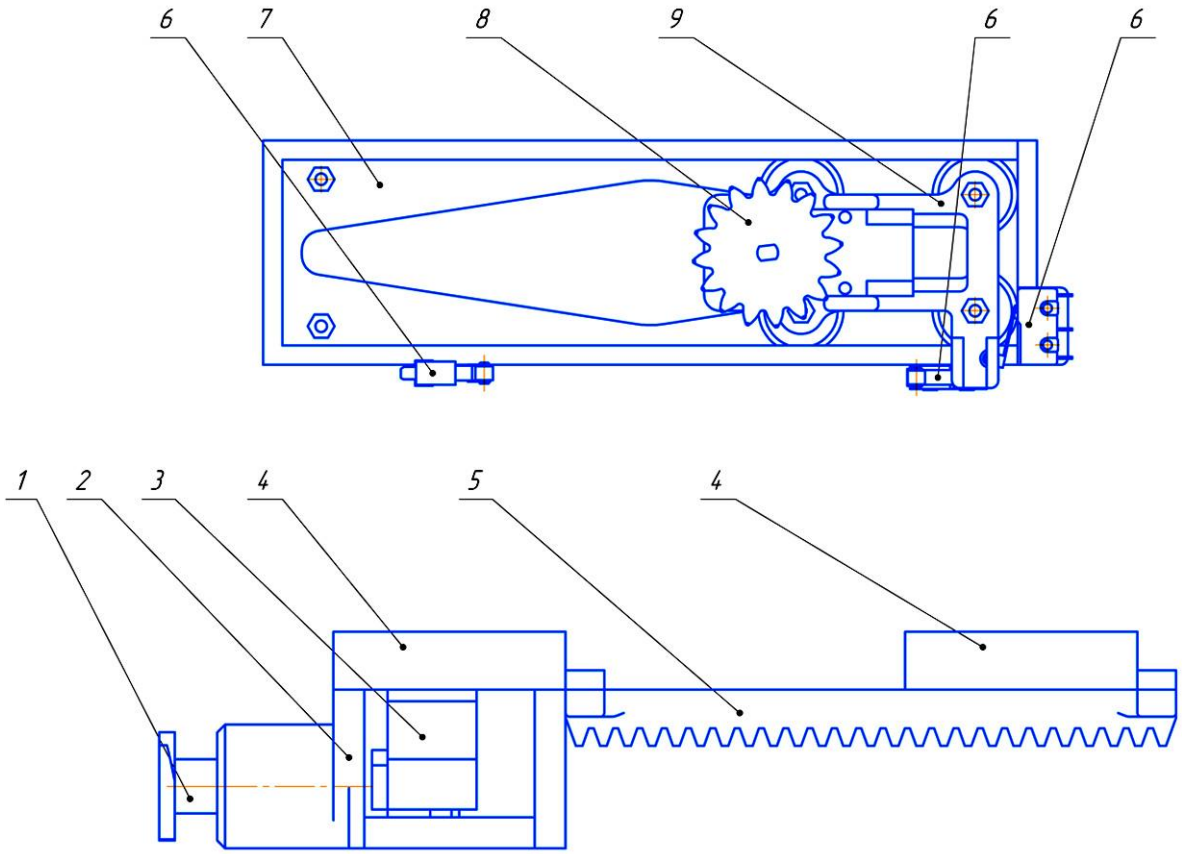


Рис. 1. Составные элементы конструкции: 1 – захват; 2 – рама захвата; 3 – сервопривод; 4 – подвес рамы захвата; 5 – зубчатая рейка; 6 – концевые включатели; 7 – направляющая привода толкателя; 8 – мотор-редуктор с шестерней; 9 – рама привода толкателя

Захват осуществляется поворотом диска специальной формы на 90° и входом его выступов в ответные пазы на АКБ. Поворот захвата (1) осуществляется сервоприводом (3), а его свободное вращение обеспечивает

пара подшипниковых опор. Эти элементы прикреплены к общей раме (рама толкателя). Рама толкателя (9) крепится к подвесам, соединенным зубчатой рейкой.

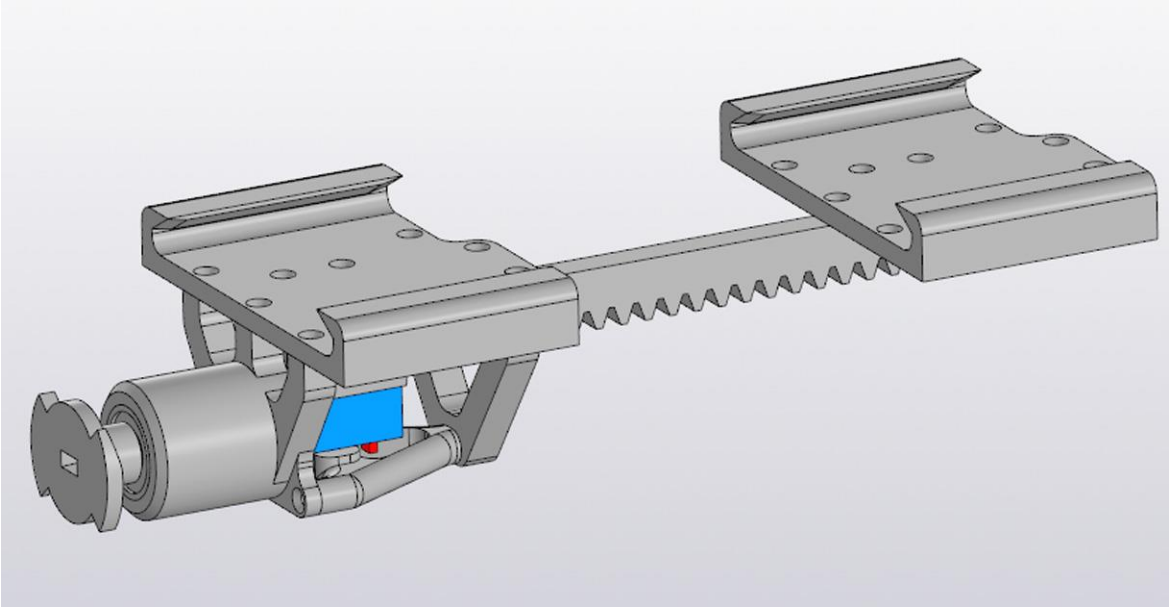


Рис. 2. Конструкция толкателя

Перемещение подвеса рамы захвата (4) осуществляется при помощи двух зубчатых реек (5) и зубчатого колеса, установленного на выходной вал мотор-редуктора (8). Для уменьшения габаритных размеров установки была применена телескопическая конструкция, требующая перемещения мотор-редуктора. Для этого он прикреплен к раме (9), имеющей четыре подшипниковые опоры, катающейся по специальной направляющей (7).

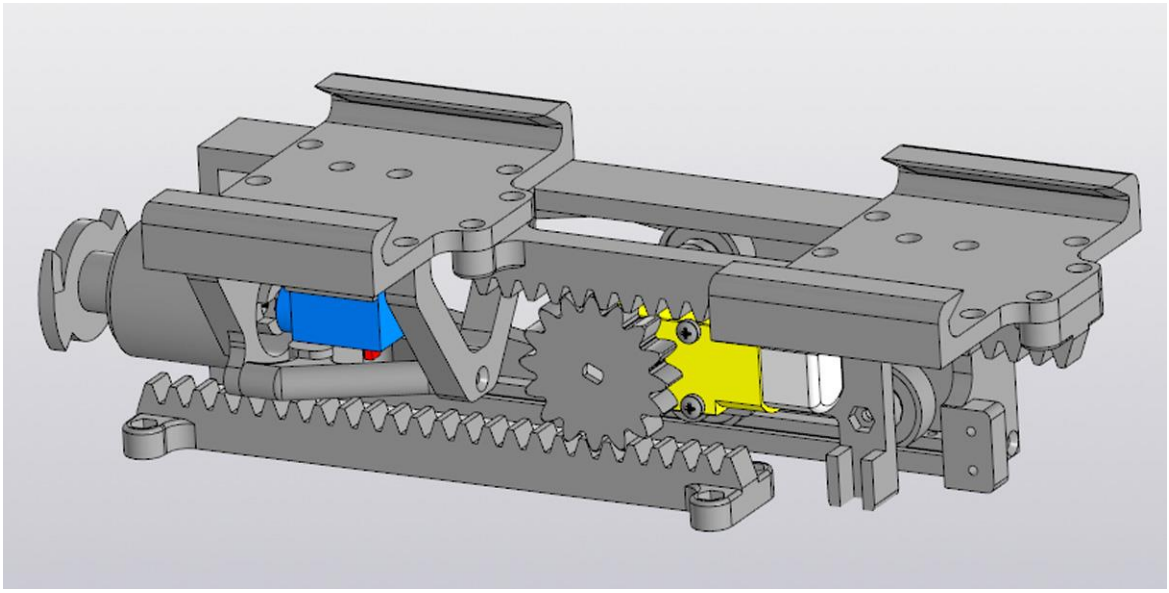


Рис. 3. Телескопическая конструкция перемещения толкателя

Данная конструкция находится в корпусе, имеющем направляющие для перемещения толкателя. Также в корпусе имеются три концевых выключателя (6). Они необходимы для определения положения толкателя и выполнения действий согласно программе.

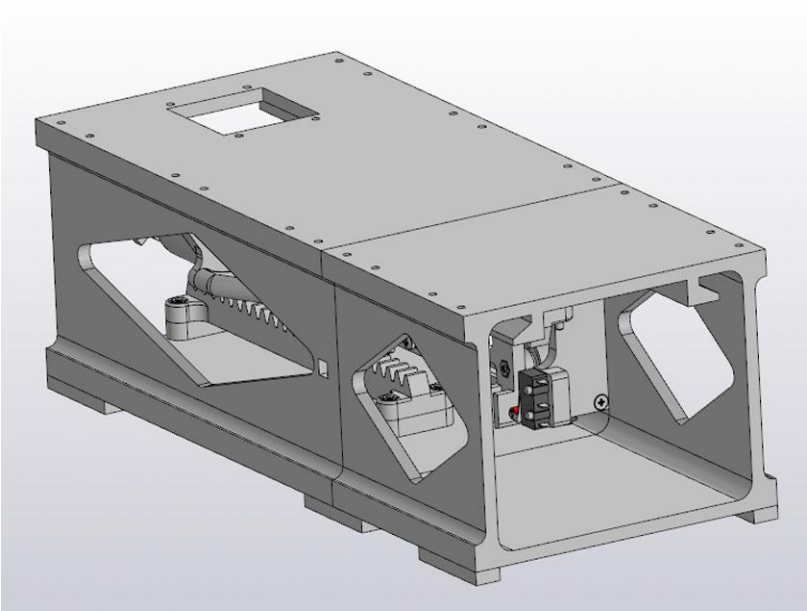


Рис. 4. Корпус с концевыми выключателями и механизмом толкателя

Корпус закреплен в раме, необходимой для соединения данного механизма с остальными частями системы. Рама состоит из уголков разной длины и специальных угловых соединителей.

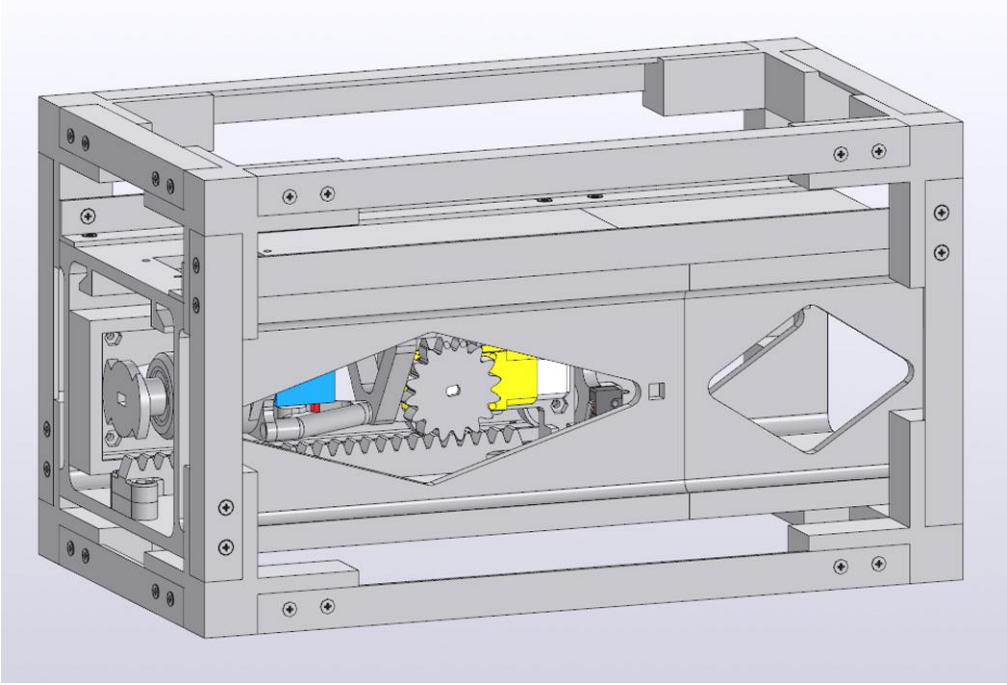


Рис. 5. Рама толкателя

В результате работ в программе Компас 3D были получены твердотельные модели (рис. 2-5), которые были распечатаны на 3D принтере. Готовые модели в ходе проверки обеспечили функционирование механизма и дали необходимую точность работы механизма

Заключение

После разработки конструкции захвата аккумуляторных батарей для беспилотных летальных аппаратов аддитивные технологии помогли реализовать идею с монитора персонального компьютера в живой макет.

Тем самым аддитивные технологии в очередной раз доказали свои преимущества, а именно облегчение процесса разработки, точность деталей, которые показали хорошие результаты в процессе испытания, выявление недостатков на этапе макетирования за короткий промежуток времени, что и ускорило процесс оптимизации конструкции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Способ управления зарядом аккумуляторной батареи и устройство для его осуществления: пат. CN118490016A КНР / заявл. 2023-02-28; опубл. 2024-08-16. URL: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/092244505/publication/CN118490016A?q=pn%3DCN118490016A, свободный. Загл. с экрана.

2. Что такое дрон и на что он способен? // Drongeek. URL: https://drongeek.ru/novichkam/chto-takoe-dron, свободный. Загл. с экрана.

3. Как 3D-принтеры используются в промышленных исследованиях и разработках // Lider-3D. URL: https://lider-3d.ru/blog/stati/kak-3d-printery-ispolzuyutsya-v-promyshlennykh-issledovaniyakh-i-razrabotkakh-rukovodstvo-po-pokupke/, свободный. Загл. с экрана.

4. Мамедова А.Г. Наружный осмотр трубопроводов с помощью дронов в тяжелых условиях // Вестник СибГУТИ. 2023. № 1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/naruzhnyy-osmotr-truboprovodov-s-pomoschyu-dronov-v-tyazhelyh-usloviyah/viewer, свободный. Загл. с экрана.

5. Машненков Д.В. Перспективы использования БПЛА в логистике // Научные исследования и разработки. 2021. № 4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-bpla-v-logistike/viewer, свободный. Загл. с экрана.

6. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб: Издательство Политехнического университета, 2013. 221 с.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ БРОНЕВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ВООРУЖЕНИЙ

Д.Б. Крюков

Пензенский государственный университет, г. Пенза

Аннотация. *Статья исследует технологии бронирования военной техники с применением алюминиевых сплавов, которые стали легкой и эффективной заменой традиционной стальной броне. Особое внимание уделено перспективным разработкам, таким как композитная броня и пеноалюминий, которые открывают новые возможности для повышения защиты и мобильности бронетехники. Также подчеркивается важность использования инновационных композиционных материалов на основе высокопрочных алюминиевых сплавов с интерметаллическим упрочнением.*

Ключевые слова: *композиционные алюминиевые броневые материалы, бронезащита, пулестойкость, военная техника*

Современные технологии бронирования значительно продвинулись вперед, выйдя за пределы традиционных материалов. Начиная со второй половины XX века, получили широкое распространение боевые машины с бронезащитой из алюминиевых сплавов.

Несмотря на кажущуюся мягкость и другие особенности алюминия, этот материал продемонстрировал свои значительные преимущества перед традиционной стальной броней и даже смог частично заменить её в ряде областей. Интерес к алюминию как к материалу для бронирования возник в СССР в конце 1940-х годов.

Изначально советские специалисты сосредоточились на разработке легкой брони для авиации, а затем приступили к аналогичным проектам для флота. Лишь к концу 1950-х годов алюминиевые сплавы начали рассматриваться для применения в сухопутной бронетехнике. Подобные процессы в то же время происходили и в других странах, где также велись активные исследования в области легких броневых материалов [1, 2].

К началу 1960-х годов советские и зарубежные металлурги разработали оптимальные составы алюминиевых сплавов с добавлением других металлов, которые обеспечивали необходимые показатели прочности и надежности. К середине 1960-х годов такие сплавы начали активно использоваться в реальных проектах легкой бронетехники. В одних случаях алюминий применялся как основной материал для бронирования, в других – комбинировался с другими металлами для достижения максимальной эффективности.

Алюминиевые сплавы доказали свою пригодность для создания легкой, но прочной брони, что особенно важно для повышения мобильности и маневренности боевых машин. Их использование позволило значительно снизить вес техники без ущерба для защиты, что стало ключевым фактором для разработки современных ББМ. Такие решения активно используются в бронетехнике по всему миру, демонстрируя свои преимущества в реальных боевых условиях.

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 [3]. 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. 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 [4]. В основу броневого материала положено армирование его структуры перфорированными сло-

ями 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 [5, 6].

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.

Разработчики продолжают совершенствовать характеристики брони, стремясь сделать её ещё прочнее, легче и надежнее. В научно-исследовательских центрах проводятся тесты, а в лабораториях создаются новые сплавы и композиционные материалы на основе сплавов алюминия, 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. Это наглядный пример того, как современные технологии способны превратить даже «неподходящие» материалы в ключевые элементы оборонных технологий. На сегодняшний день заказчики и разработчики бронетехники имеют доступ к обширному перечню материалов, и алюминиевые сплавы занимают в этом списке важное место.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Скляров В.А., Гребенников С.Ф. Бронетанковая техника: история, конструкция, применение. Москва: Воениздат, 2005. 320 с.

2. Федосеев С.В. Боевые машины пехоты и бронетранспортеры. Москва: Экспринт, 2003. 256 с.

3. Современные алюминиевые сплавы для бронирования / НИИ стали. Москва: НИИ стали, 2022. 45 с.

4. Крюков Д.Б. Аспекты получения легких броневых композиционных материалов с механизмом локализации хрупких трещин в структуре при баллистическом воздействии // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер. Материалы. Конструкции. Технологии. 2023. № 1 (25). С. 20-28.

5. 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.

6. Крюков Д.Б. Перспективные легкие трещиностойкие брони, полученные с применением технологии сварки взрывом // Упрочняющие технологии и покрытия. 2022. Т. 18. № 10 (214). С. 440-443.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОАГУЛЯЦИИ ЖИДКИХ СТОКОВ В ПРИСУТСТВИИ ПОДЩЕЛАЧИВАЮЩЕГО РЕАГЕНТА ИЗ ФОСФОГИПСА

Д.И. Монастырский
Научный руководитель: к.т.н., доцент Куликова М.А.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск

Аннотация. *В работе представлены результаты моделирования эксперимента по коагулированию жидких отходов животноводства. В качестве коагулянта использован восстановленный фосфогипс. Показано, что полученные в ходе моделирования значения хорошо согласуются с экспериментальными данными.*

Ключевые слова: *коагуляция жидких отходов, моделирование процесса коагуляции, фосфогипс*

Современные технологические основы производства ценных продуктов основаны на необходимости проведения модельных оценок [1]. В частности, процессы коагуляции сложных дисперсных систем в процессе фракционирования жидких отходов животноводческих ферм под действием подщелачивающего реагента. Моделирование процессов, происходящих в ходе коагуляции, является интересной инженерной задачей [2].

Математическое описание процесса коагуляции под действием суспензии восстановленного фосфогипса может быть представлено следующим образом.

Для построения математической модели были приняты следующие необходимые допущения: 1) частицы, подверженные коагуляции, представляют собой октаэдры (как известно [3], эта форма характерна для органических солей кальция); 2) лимитирующей стадией является внешняя диффузия; 3) процесс седиментации является равновесным и подчиняется уравнению Стокса; 4) для описания структуры потока жидкости может быть использована модель идеального вытеснения; 5) частицы коагулирующего вещества перемещаются строго вниз.

В рассматриваемой системе можно предположить протекание следующих реакций (1)-(3):

– взаимодействие (1) образующейся серной кислоты и мочевины

$$H_2SO_4 + (NH_2)_2CO = SN_2O_3H_2 + 2H_2O \quad (1)$$

– взаимодействие (2) мочевой кислоты с гидроксидом кальция

$$C_5H_4N_4O_3 + Ca(OH)_2 = (C_5H_2N_4O_3)Ca + 2H_2O \quad (2)$$

– образование (3) коллоидной мицеллы на основе урата кальция с катионами Ca^{2+} в адсорбционном слое и гидроксид-анионами в диффузном слое

$$\{m(C_5H_2N_4O_3)Ca \cdot nCa^{2+} \cdot (n\text{-}x)\ OH^-\}^{2+}\ 2x(OH^-). \quad (3)$$

Заряд коллоидной частицы положительный, поэтому при увеличении концентрации гидроксид-ионов (повышении pH) происходит потеря агрегативной устойчивости, коагуляция с последующей седиментацией.

Для построения математической модели процесса осветления рассмотрим движение октаэдрической частицы в слое неподвижной жидкости. Сила тяжести частицы выбранной октаэдрической формы направлена вниз. Под действием ускорения свободного падения движение частицы будет равноускоренным до момента, когда оно сравняется с силой сопротивления движению среды. Начиная с этого момента скорость седиментации остается постоянной и силы, действующие на частицу, могут быть описаны уравнением (4):

$$G - G_1 - R = 0, \quad (4)$$

где G – сила тяжести (может быть рассчитана по уравнению 5), равная весу частицы, Н; G_1 – выталкивающая сила (сила Архимеда), равная весу жидкости в объёме тела (рассчитывают по уравнению 6), Н; R – сила сопротивления среды (определяется уравнением 7), Н.

$$G = m \cdot g = V \cdot \rho_т \cdot g = \frac{a^3\sqrt{2}}{3}\rho_т \cdot g, \quad (5)$$

где m – масса твердой частицы, кг, g – ускорение свободного падения, м^2/с, V – объем частицы, м^3, $\rho_т$ – плотность твердой частицы, кг/м^3, a – длина ребра октаэдра частицы, м.

$$G_1 = V_т \cdot \rho_c \cdot g = \frac{a^3 \cdot \sqrt{2}}{3}\rho_c.g, \quad (6)$$

где ρ_c – плотность среды, кг/м^3.

$$R = \zeta \cdot S \cdot \rho_c \cdot \frac{\omega_{oc}^2}{2} = \zeta \cdot (2 \cdot a^2 \cdot \sqrt{3}) \cdot \rho_c \cdot \frac{\omega_{oc}^2}{2}. \quad (7)$$

где ζ – коэффициент сопротивления среды (безразмерный), S – площадь контакта частицы со средой, м^2, ω_{oc} – скорость осаждения, м/с.

Зная принятую форму частицы (октаэдр), можно рассчитать площадь контакта частиц (8)

$$S = 2 \cdot a^2 \cdot \sqrt{3}. \quad (8)$$

Выражение для величины скорости осаждения (9) получаем, подставляя выражения (5)-(7) в формулу (8):

$$\omega_{\text{ос}} = \sqrt{\frac{a \cdot \sqrt{2} \cdot g \cdot (\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{с}})}{3 \cdot \sqrt{3} \cdot \zeta \cdot \rho_c}}. \quad (9)$$

Согласно данным эксперимента, размер частиц дисперсной фазы принимает значения 500-800 мкм. Оценочный расчет скорости осаждения показывает результаты 22,8-88,2 см/ч для частиц 400-800 мкм. Полученные данные хорошо согласуются с экспериментальными данными: полное осветление надосадочной жидкости в ходе лабораторных экспериментов наблюдали через 30-35 мин.

Таким образом, проведено моделирование эксперимента по коагулированию жидких отходов животноводства под действием восстановленного фосфогипса. Показано, что полученные данные хорошо согласуются с экспериментальными данными.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Qin Y., Yuan R., Zhang X., He X. Prediction model for coal chemical wastewater quality after catalytic ozonation process treatment based on deep learning algorithm: Performance evaluation and model comparisons // Process Safety and Environmental Protection. 2025. N 107059.

2. Егоров Д.Л. Программы-оболочки для автоматизации процесса проведения теоретического изучения химических реакций // Научно-технический вестник Поволжья. 2025. № 3. С. 19-21.

3. Weng Y., Zheng J., Lai H., Cui M., Ding X. Biomineralization of soil with crude soybean urease using different calcium salts // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2024. V. 16. Is. 5. P. 1788-1798.

НООМЕТРИЯ МОЗГА: МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

П.С. Мартюшева
Научный руководитель: д.м.н., профессор Еремин А.Л.

Кубанский государственный университет, г. Краснодар

Аннотация. *В статье осуществляется обзор на ноометрию как область нейронаук, занимающуюся изучением количественных характеристик и функций мозга, а также способов осуществления исследований в сфере ноометрии.*

Ключевые слова: *ноометрия, мозг, нейробиология, магнитно-резонансная томография*

Ноометрия – относительно новая область науки, сосредоточенная на количественном анализе и измерении различных аспектов нейронной деятельности и структуры мозга.

Основная задача ноометрии заключается в понимании функциональных взаимосвязей между нейронными сетями и их влиянии на поведение, мысли и эмоции.

Ноометрия сосредоточена на исследовании:

1. Нейронных основ сознания [1] – как активность мозга формирует субъективный опыт.

2. Когнитивных процессов – мышление, внимание, память, креативность.

3. Метапознания [2] – способности человека оценивать и регулировать собственные мыслительные процессы.

4. Искусственного интеллекта и нейроинтерфейсов – возможности интеграции человеческого разума с вычислительными системами [3].

Основные методы ноометрии

Нейровизуализация – функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ) [4] – регистрирует кровоток, связанный с активностью нейронов и используется для построения карт функциональной связи и для отслеживания паттернов деятельности при когнитивных задачах.

Электроэнцефалография (ЭЭГ) [5] – фиксирует внешнюю электрическую активность мозга через электроды на голове и используется для анализа ритмов (альфа, бета, тета) которые связаны со следующими функциями: внимание, память, знание;

Магнитоэнцефалография (МЭГ) [6], измеряющая магнитные поля, генерируемые нейронами, предоставляющая высокое временное и пространственное разрешение, что является критичным для исследования динамики сознания.

Геометрический анализ – метод корковых градиентов [7], рассматривает архитектуру мозга как непрерывный объект, вместо дискретных зон; позволяет связать геометрию коры с такими функциями сознания как внутреннее напряжение и сенсорная интеграция; волновые модели, где форма мозга используется для предсказаний распространения нейронных волн, конкурируют с традиционными коннектомными моделями.

Инвазивные технологии – глубинная стимуляция мозга (DBS) [8] – имплантаты, регулирующие активность нейронных сетей при болезнях Паркинсона или депрессии.

Нейромодуляция – сочетает электростимуляцию и нейрохимию для коррекции патологий, таких как резистентная депрессия.

Преимущества ноометрии в исследовании мозга

Ноометрия может помочь объединить данные из различных нейровизуализационных методов (фМРТ, ЭЭГ, МЭГ и др.), нейропсихологии, ко-

гнитивной психологии и философии сознания, чтобы создать более полную картину работы мозга [9]. Это метод ставит в центр внимания сознание и субъективный опыт, позволяет лучше понять, как именно нейронная активность связана с сознательным восприятием и когнитивными процессами.

Кроме того, ноометрия помогает разгадать сложные взаимодействия в рамках обширных сетей мозга, участвующих в когнитивные функции; стимулирует разработку новых методов и подходов к исследованию мозга, учитывающих влияние человеческого фактора и субъективного опыта

Ограничения ноометрии в исследовании мозга

Многие аспекты сознания и субъективного опыта трудно выразить и измерить в количественных терминах.

В процессе обработки данных часто приходится сталкиваться с субъективизмом, что создает сложности с верификацией и воспроизводимостью результатов, а также с трудностью определения причинно-следственных связей между нейронной активностью и когнитивными процессами [10].

Ноометрия – это междисциплинарная область, которая сочетает в себе нейробиологию, информационные технологии и психологию. С ее помощью становится возможным углубленное изучение природы сознания и мышления, что открывает новые возможности для улучшения когнитивных функций и интеграции человека с технологиями будущего.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Деан С. Сознание и мозг: как мозг кодирует наши мысли / пер. с англ. А. Капанадзе. Москва: Карьера Пресс, 2014. 333 с.

2. Тонони Д. Фи: путешествие от мозга к душе / пер. с англ. А. Анваера. Москва: АСТ, 2012. 412 с.

3. Мецингер Т. Туннель эго: наука о сознании и миф о себе / пер. с нем. Д. Хлебникова. Москва: АСТ, 2009. 396 с.

4. Эдельман Д.Ю., Тонони Д. Сознание: как материя становится воображением /пер. с англ. А. Капанадзе. Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2001. – 288 с.

5. Кох К. Чувство самой жизни: почему сознание распространено повсюду / пер. с англ. А. Степанова. Санкт-Петербург: Питер, 2019. 352 с.

6. Дамасио А. Сам приходит на ум: как мозг создает сознание / пер. с англ. Д. Хлебникова. Москва: Карьера Пресс, 2010. 367 с.

7. Хуанг Н.Е., Атто-Окине Н.О. Гильберт-Хуанг преобразование в инженерии. Москва, 2005. 300 с.

8. Баарс Б. В театре сознания: рабочее пространство ума / пер. с англ. А. Капанадзе. Москва: URSS, 1997. 240 с.

9. Варела Ф. Нейрофеноменология: методологические основания изучения сознания // Журнал исследований сознания. 1996. URL: http://scholar.google.com/citations?user=xyz.

10. Чалмерс Д. Сознающий ум: в поисках фундаментальной теории. 1996. URL: http://consc.net/ online/1.html

ЭФФЕКТ ДЛИНЫ АЛКИЛЬНОЙ ГРУППЫ НА КАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИМИДАЗОЛИЕВЫХ СОЛЕЙ ФОСФОРНО-ВОЛЬФРАМОВОЙ ГЕТЕРОПОЛИКИСЛОТЫ В РЕАКЦИИ СИНТЕЗА 1-МЕТОКСИ-2-ПРОПАНОЛА ИЗ ПРОПИЛЕН ОКСИДА И МЕТАНОЛА

Дж.В. Мванги[1], С.А. Приходько[2], В.Н. Панченко[2], Шефер К.И.[1,2], Тимофеева М.Н.[2]

[1]Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск
[2]Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация. *В работе изучены каталитические свойства имидазолиевых солей фосфорновольфрамовой кислоты (IM-$H_2PW_{12}O_{40}$) в реакции метанола с оксидом пропилена (PO) с получением 1-метокси-2-пропанола (1-MP-2). Установлено, что увеличение длины алкильной группы в катионе [C_{xH}-MIM]$^+$ приводит к увеличению конверсии PO и снижению селективности по 1-MP-2. Показано преимущество проведение реакции в условиях СВЧ-нагрева по сравнению с термическим нагревом (ТН). В присутствии C_{10H}-MIM-$H_2PW_{12}O_{40}$ соли 80,8 % конверсия PO и 59,3 % выход 1-MP-2 под действием микроволнового излучения достигаются на 2 часа быстрее по сравнению с процессом с ТН.*

Ключевые слова: *1-метокси-2-пропанол, пропилен оксид, метанол, ионные жидкости, гетерополикислота, СВЧ-технологии*

В настоящее время в химической промышленности наблюдается тенденция замещения моноалкиловых эфиров этиленгликоля на моноалкиловые эфиры пропиленгликоля, что связано с их низкой токсичностью, а также широкой возможностью их применения в качестве подходящих растворителей в органическом синтезе. Так, по данным Grand Research Store [1], мировой рынок монометилового эфира пропиленгликоля (1-MP-2) оценивался в 333,9 млн долларов США в 2023 году и, по прогнозам, достигнет 510 млн долларов США к 2030 году при среднегодовом темпе роста 6,5 %.

В промышленности 1-МР-2 получают с использованием оксида пропилена с метанолом.

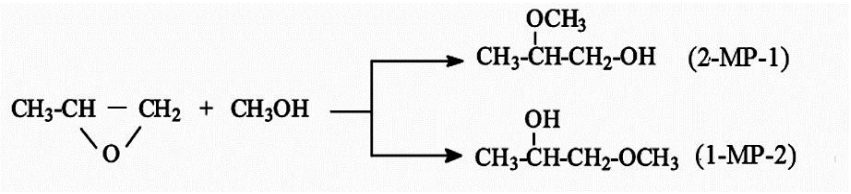


Схема реакции оксида пропилена с метанолом

Скорость реакции и селективность 1-МР-2 можно контролировать путем изменения кислотно-оснóвных свойств катализатора. Увеличение кислотности Сравнение каталитических свойств C_{10H}-$MIMH_2PW_{12}O_{40}$ соли в реакции в условиях СВЧ и термического нагрева показало, что 80,8 % конверсия РО и 59,3 % выход 1-МР-2 в реакции под действием СВЧ излучения достигается на 2 ч быстрее по сравнению с процессом с термическим нагревом. Увеличение кислотности каталитической системы должно приводить к увеличению скорости реакции, в то время как увеличение оснóвности системы способствует росту селективности по отношению к 1-МР-2. Этот факт способствует тому, что большинство современных исследований сосредоточены на разработке катализаторов оснóвного типа для улучшения селективности по 1-МР-2.

В литературе показана возможность применения в качестве катализаторов ионных жидкостей (ИЖ). Однако, несмотря на привлекательность ИЖ, проблема их отделения от продуктов реакции создает определенные трудности их использования.

Перспективной стратегией преодоления этой проблемы является создание органических-неорганических композитов, например на основе гетерополикислоты (IL-HPA).

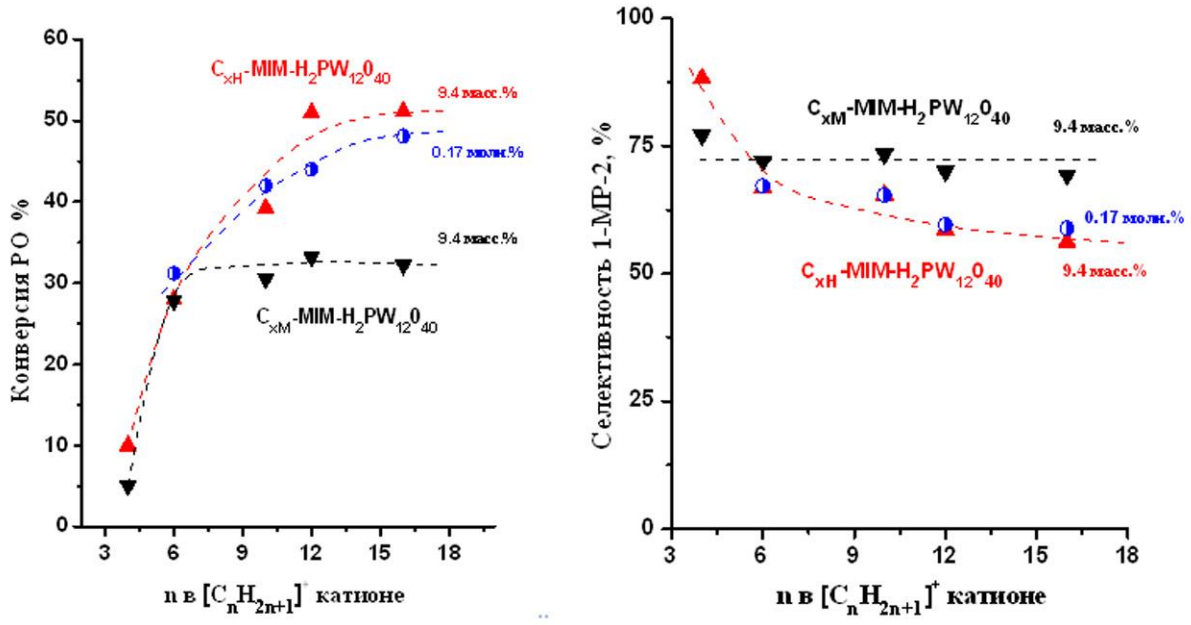
Комбинация органических катионов с гетерополианионами позволяет создавать не только гетерогенные системы, но и сочетать как свойства катиона, так и гетерополианиона.

Целью данной работы было установление основных факторов, влияющих на каталитические свойства имидазолиевые соли фосфорно-вольфрамовой гетерополикислоты (IL-$H_2PW_{12}O_{40}$) в реакции синтеза 1-МР-2 из оксида пропилена и метанола. IL-$H_2PW_{12}O_{40}$ соли были образованы анионом $[H_2PW_{12}O_{40}]^{2-}$ и катионами 1-алкил-3-метилимидазолия (C_{xH}-MIM-$H_2PW_{12}O_{40}$, алкил – C_xH_{2x+1}, x = 4, 6, 10, 12 и 16) и 1-алкил-2, 3-диметилимидазолия (C_{xM}-MIM-$H_2PW_{12}O_{40}$, алкил – C_xH_{2x+1}, x = 4, 6, 10, 12 и 16).

Реакция была изучена при мольном отношении MeOH/PO равном 8,5 при 140 °C в условиях СВЧ-воздействия. Показано, что длина алкильной группы в имидазолиевом катионе C_{xM}-$MIMH_2PW_{12}O_{40}$ соли не влияет на конверсию РО и селективность реакции по 1-МР-2 (рисунок). В то же вре-

мя с увеличением длины алкильной группы в имидазолиевом катионе C_{xH}-MIM$H_2PW_{12}O_{40}$ соли конверсия РО возрастает, а селективность по 1-МР-2 снижается (рисунок).

Полученные результаты коррелировали с результатами ИК спектроскопии, согласно которым изменения электронной плотности в имидазолиевом кольце влияют на силу взаимодействия между катионом и гетерополианионом и, таким образом, на силу кислотных центров.



Влияние длины алкильной группы в $[C_nH_{2n+1}MIM]^+$ катионе солей C_{xH}-MIM-$H_2PW_{12}0_{40}$ и C_{xM}-MIM-$H_2PW_{12}0_{40}$ на селективность по 1-МР-2 и конверсию РО. (Условия эксперимента: 29,6 ммоль РО, МеОН/РО – 8,5 моль/моль, 140 °С, 60 мин, СВЧ-нагрев)

Показана высокая эффективность C_{10H}-MIM-$H_2PW_{12}O_{40}$ соли, рассчитанная как отношение моль образованного 1-МР-2 к моль загруженного катализатора, в 10-100 раз выше по сравнению с эффективностью солей, приведенных в литературе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН № FWUR-2024-0035).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Функционально-градиентные металлические биоматериалы: техники, текущее состояние и перспективы. URL: https://www.grandresearchstore.com/

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ БИОМАТЕРИАЛЫ: ТЕХНИКИ, ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Н.Р. Моргунов, Е.В. Сеченева
Научный руководитель: к.т.н. Коробов А.А.

Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов

Аннотация. *Функционально-градиентные материалы (ФГМ) представляют собой композиты с постепенно изменяющимися свойствами, что минимизирует механические напряжения. В биомедицине, особенно в имплантологии, функционально-градиентные материалы комбинируют механическую прочность металлов с биосовместимостью керамик и полимеров, улучшая остеоинтеграцию, коррозионную стойкость и биоинертность. Методы производства включают порошковую металлургию, аддитивное производство, плазменное напыление и литье с контролем состава. Несмотря на достижения, клиническое применение функционально-градиентных материалов ограничено из-за высоких затрат и сложности сертификации. Перспективы включают развитие биоактивных покрытий, интеграцию сенсорных функций, использование искусственного интеллекта и 3D-печати для индивидуализированных имплантатов.*

Ключевые слова: *функционально-градиентные материалы, металлические биоматериалы, имплантология, остеоинтеграция, биосовместимость, персонализированная медицина, 3D-печать*

Функционально-градиентные материалы (ФГМ) – это особый тип композитов, в которых свойства материала варьируются постепенно, по объему изделия. Такое постепенное изменение свойств обеспечивает плавный переход между разными материалами или свойствами, исключая резкие переходы. Как следствие, снижается концентрация напряжений и увеличивается общий срок эксплуатации конструкций. В области биомедицины, в особенности в имплантологии и регенеративной медицине, ФГМ получили широкое применение. Это обусловлено их способностью успешно сочетать механическую прочность, характерную для металлов, с биосовместимостью, присущей керамике и полимерам.

Функционально-градиентные материалы нашли широкое применение в качестве конструкционных материалов для медицинских имплантатов, обусловленное их высокой прочностью, сопротивлением коррозии и продолжительным сроком службы. Вместе с тем чистые металлы, например, титан, кобальто-хромовые сплавы, а также нержавеющая сталь, демонстрируют ограниченную биосовместимость и потенциально могут

приводить к механическому несоответствию с костной тканью. Внедрение градиентной структуры в металлических биоматериалах обеспечивает следующие возможности:

- снизить модуль упругости на границе с тканью для предотвращения резорбции кости;
- повысить остеоинтеграцию за счёт пористого внешнего слоя;
- улучшить коррозионную стойкость и биоинертность покрытия;
- интегрировать антимикробные, биоактивные компоненты.

На сегодняшний день разработано несколько подходов к производству функционально-градиентных металлических биоматериалов.

Порошковая металлургия, где градиенты формируются путём послойного нанесения порошков различных составов с последующим спеканием. Она обеспечивает возможность точного регулирования состава и уровня пористости.

Аддитивное производство (3D-печать): методы селективного лазерного плавления (SLM), электронно-лучевого плавления (EBM) и лазерного осаждения дают возможность в реальном времени формировать сложные градиенты с высокой точностью. Данный подход наиболее перспективный метод для изготовления индивидуальных имплантатов.

Металлоформование и литьё с контролируемым составом представляют собой методы, дающие возможность создавать градиенты в массивных деталях. Однако у этих способов есть существенный недостаток: они не обеспечивают высокой точности контроля над микроструктурой материала.

Современные исследования в области металлических функционально-градиентных материалов переживают бурный рост в ряде направлений. Так, значительное внимание уделяется разработке ортопедических имплантатов, характеризующихся градиентом перехода от плотного титана к пористой структуре. Это нацелено на обеспечение максимально эффективного замещения костной ткани.

В дентальных имплантатах продолжается активная работа по улучшению перехода между костью и поверхностью имплантата. Суставные протезы также претерпевают усовершенствования, благодаря использованию износостойких и биоактивных покрытий, повышающих их долговечность и функциональность. Не менее важны индивидуализированные 3D-печатные конструкции с переменной плотностью для краниальных и лицевых реконструкций.

Несмотря на достигнутые успехи, практическое использование ФГМ в клинической практике пока ограничено. Это связано с трудностями сертификации, существенных производственных издержках и дефиците серийных промышленных решений.

В будущем прогнозируется широкое внедрение функционально-градиентных металлических материалов в клиническую практику, что ста-

нет возможным благодаря целому ряду технологических прорывов. Ключевыми направлениями являются разработка передовых биоактивных и антибактериальных покрытий.

Важное значение имеет применение искусственного интеллекта для оптимизации структуры материалов, а также удешевление и стандартизация аддитивных технологий производства [1, 2].

Существенным шагом вперед станет создание индивидуальных имплантатов на основе медицинских изображений, полученных, например, с помощью КТ или МРТ, а также применением цифровых двойников отдельных органов и систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Применение метода градиентного нейросетевого управления в биотехнических системах / С.В. Фролов, А.А. Коробов, К.С. Савинова, А.Ю. Потлов // Информационные технологии и технические средства управления (ICCT-2023): материалы VII Международной научной конференции, Москва, 02-06 октября 2023 года. Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2023. С. 193-195. DOI 10.25728/icct.2024.057.

2. Градиентный метод нейросетевого управления многосвязными нелинейными нестационарными стохастическими системами / С.В. Фролов, А.А. Коробов, А.Ю. Потлов, К.С. Савинова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 5. С. 41-48. DOI 10.25791/pribor.5.2021.1262.

ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ОЖЕЛЕЗНЕННОГО ПОЛИТИТАНАТА КАЛИЯ В МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ПОЧВА-БЕНЗИН

В.А. Мордвинкин
Научный руководитель: к.х.н., доцент Никитюк Т.В.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В статье рассмотрена фотокаталитическая активность ожелезненного полититаната калия в модельной системе почва-бензин.*

Ключевые слова: *полититанат калия, модифицированный железом (3+), фотокаталитическая активность, модельная система почва-бензин*

Загрязнение почв нефтепродуктами представляет собой серьезную экологическую проблему, связанную с их токсичностью и устойчивостью в окружающей среде.

Традиционные методы очистки, такие как механическое удаление или химическая обработка, часто оказываются дорогостоящими и не обеспечивают полного разложения загрязнителей. В последние годы активно исследуются фотокаталитические материалы, способные разлагать органические соединения под воздействием света.

Диоксид титана (TiO_2) является хорошо известным фотокатализатором, однако его активность ограничена ультрафиолетовой (УФ) областью спектра, составляющей лишь малую часть солнечного света. Для повышения эффективности фотокатализа в видимой области спектра, которая доминирует в солнечном излучении, проводятся модификации TiO_2 и других материалов.

Модификация железом позволяет расширить его фотокаталитическую активность в видимую область [1-3] спектра, что делает его перспективным для экологических применений.

Ожелезненный полититанат калия (Fe-ПТК) синтезировали из базового ПТК марки ПТК-4 ($[TiO_2]/[K_2O]$ = 3,94, pH = 10,8, ООО «Нанокомпозит»). pH суспензии ПТК снижали до 3,5, добавляя 30 % H_2SO_4 при перемешивании на магнитной мешалке ES-6120. В дисперсию частично протонированного ПТК вводили раствор сульфата железа (III) ([ПТК]:[Fe] = 10:5,6, 0,02 моль Fe на 10 г ПТК), корректируя pH с помощью 10 % KOH и 30 % H_2SO_4, контролируя pH-метром pH-150M. Смесь перемешивали 3 часа, осаждали 24 часа, промывали дважды с фильтрацией, сушили при 40–50 °C и растирали в ступке до мелкодисперсного порошка.

Образцы почвы были собраны с участка, загрязненного нефтепродуктами, и проанализированы на содержание нефтепродуктов, которое составило 68 мг/кг (метод ИК-флуориметрии по методике ПНД Ф 14.1:2:4.128-98).

Почва была разделена на контрольную и экспериментальную группу образцов. Обе группы содержали образец почвы с массовой долей ожелезненного ПКТ 1 %. Оба образца содержались в чашках Петри диаметром 90 мм в камере со стабильными температурой и влажностью, интенсивность освещения составляла 350 люкс. Контрольные образцы были обернуты плотной бумагой для предотвращения попадания света.

Первоначальная концентрация нефтепродуктов в почве составляла 68 мг/кг во всех образцах. После 24-часовой обработки в контрольной группе (Fe-ПТК в темноте) концентрация снизилась до 67 мг/кг, тогда как в облучаемой группе (Fe-ПТК под видимым светом) она уменьшилась до 63 мг/кг.

Незначительное снижение концентрации нефтепродуктов в контрольной группе (с 68 до 67 мг/кг) может быть обусловлено адсорбцией загрязните-

лей на поверхности Fe-ПТК. В то же время более выраженное снижение в облучаемой группе (с 68 до 63 мг/кг) свидетельствует о том, что облучение видимым светом активирует фотокаталитические свойства Fe-ПТК, способствуя разложению нефтепродуктов.

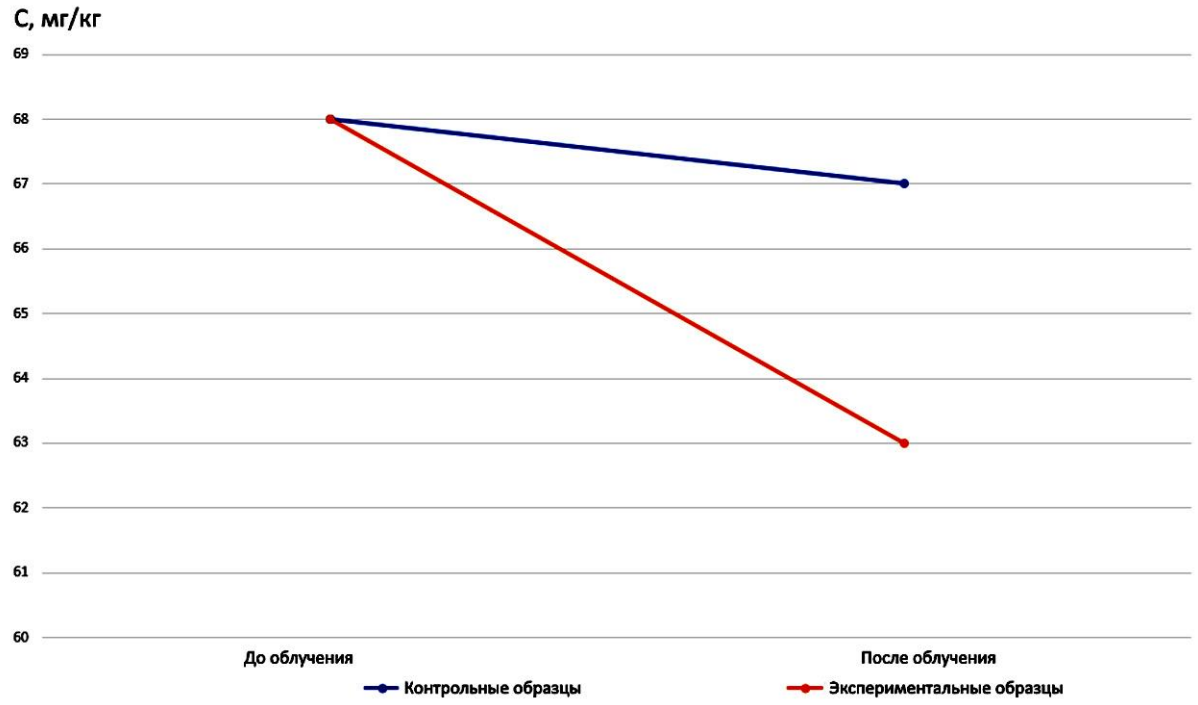


Рис. 1. Концентрация нефтепродуктов в образцах почвы до и после обработки Fe-ПТК в контрольных (темнота) и облучаемых условиях

Улучшение эффективности под воздействием света соответствует поведению модифицированных железом фотокатализаторов. Введение железа создает промежуточные энергетические уровни в запрещенной зоне материала, что позволяет поглощать видимый свет и генерировать активные формы кислорода (АФК), такие как гидроксильные радикалы (•OH) и супероксид-анионы (O_2^-). Эти соединения способны окислять углеводороды нефтепродуктов до менее токсичных продуктов, таких как углекислый газ и вода.

Несмотря на обнадеживающие результаты, степень деградации (около 7,4 % в облучаемой группе) указывает на необходимость дальнейшей оптимизации параметров, таких как дозировка Fe-ПТК, интенсивность света или продолжительность облучения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mersal M., Zedan A.F., Mohamed G.G. et al. Fabrication of nitrogen doped TiO_2/Fe_2O_3 nanostructures for photocatalytic oxidation of methanol based wastewater. Sci Rep 13, 4431 (2023).

2. Mengyuan Liu, Jun Song, Jinlan Tang, Yuhua Zhu, Qing Shao, Yiqun Chen, Zizheng Liu, Pengchao Xie – Photoactivation of sulfite by $FeTiO_3$ for organic pollutant degradation: Performance and mechanism, Separation and Purification Technology, Volume 355, Part B, 2025, 129757, ISSN 1383-5866.

3. Zarazúa-Morín M.E., Torres-Martínez L.M., Moctezuma E. et al. Synthesis, characterization, and catalytic activity of $FeTiO_3/TiO_2$ for photodegradation of organic pollutants with visible light. Res Chem Intermed 42, 1029-1043 (2016).

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛДЕНФТОРИДА

К.В. Набутова, Г.С. Яхина
Научный руководитель: к.х.н., доцент Базунова М.В.

Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа

Аннотация. *В статье рассматривается влияние ультрафиолетового (УФ) излучения на физико-механические свойства композитов, созданных на основе термостойких полимеров с добавлением неорганических наполнителей. Исследование направлено на анализ изменений, происходящих в структуре и характеристиках композитов под воздействием факторов внешней среды.*

Ключевые слова: *композиты, наполнитель, поливинилденфторид, модуль упругости, разрывное напряжение, разрывное удлинение*

На сегодняшний день наполнение дисперсными наполнителями является самым популярным методом создания различных полимерных композиционных материалов (ПКМ) с улучшенными эксплуатационными и технологическими свойствами.

Наибольшее влияние на комплекс свойств ПКМ оказывает следующий ряд факторов: природа термопласта и наполнителя, форма и размер частиц наполнителя, концентрация наполнителя, равномерное распределение частиц наполнителя по объему полимерной матрицы.

Введение рационального количества минеральных и других наполнителей позволяет значительно улучшить комплекс физико-механических характеристик, снизить стоимость и расширить сырьевую базу полимерных композиционных материалов. Так, при добавлении сравнительно небольшого количества неорганических частиц в полимерные матрицы тер-

мопластов увеличиваются их жесткость и твёрдость, а также изменяются теплофизические свойства за счет структурной модификации [1].

Одним из представителей термопластов является поливинилиденфторид (ПВДФ), обладающий комплексом уникальных свойств, таких как механическая прочность, устойчивость к коррозии, низкая проницаемость для газов и жидкостей, высокая степень кристалличности и термическая стабильность, устойчивость к ползучести при повышенных температурах. Поэтому композиты на основе ПВДФ, наполненного неорганическими дисперсными наполнителями могут быть использованы для создания термо- и теплостойких конструкционных материалов. Перспективным представляется использование в качестве наполнителей полимерных композиционных материалов алюмосиликатные полые микросферы (АСМ).

Важным преимуществом использования АСМ в качестве наполнителя является низкая плотность, обеспечивающая удобство использования, большую легкость смешивания, снижение транспортных затрат, низкую просадку и перекос, легкость обработки резанием, сверления. Также одним из широко используемых наполнителей является стекловолокно (СВ), имеющее отличную прочность и долговечность, термическую стабильность, устойчивость к ударам, химическим веществам, трению и износу. К тому же, стекловолокно обладает конкурентоспособной ценой, малым весом, огнестойкостью и отличными экологическим характеристикам.

Одним из факторов, лимитирующих время эксплуатации ПКМ, является низкая устойчивость полимерной матрицы к действию факторов внешней среды, в том числе ультрафиолетового излучения (УФ-излучения), приводящего к деструкции цепей полимера по радикальному механизму, ветвлению цепей и, как следствие, повышению его хрупкости [2].

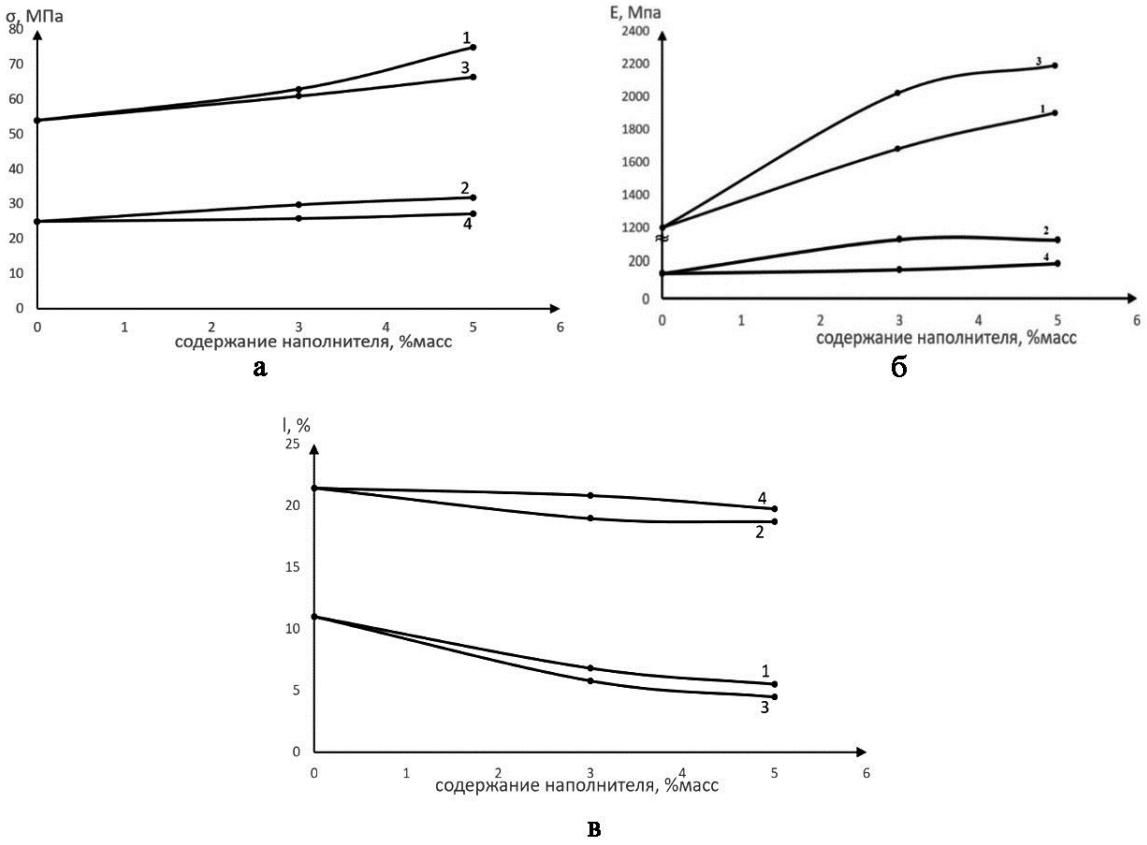
При переработке и эксплуатации полимерных материалов под действием факторов внешней среды достаточно часто наблюдается изменении их свойств. Подобные явления принято называть «старением» полимерного материала.

Старение – изменение структуры со временем, сопровождающееся изменением механических характеристик. Старение может вызываться как химическими процессами (в основном деструкцией), так и структурными перестройками [3].

Можно ожидать, что, используя способность некоторых весьма доступных и относительно дешевых неорганических веществ защищать полимеры от УФ-облучения, в ряде случаев удастся добиться необходимого уровня стабильности свойств материалов в процессе эксплуатации без дополнительного введения в композицию специальных светостабилизаторов, что обернется определенным экономическим эффектом.

В связи с вышесказанным целью явилось изучение изменения физико-механических свойств композитов на основе ПВДФ, наполненного неорганическими наполнителями (АСМ или СВ), подвергнутых воздействию факторов окружающей среды (УФ-облучение, дождевание) в условиях ускоренных климатических испытаний.

Анализ зависимостей физико-механических характеристик от содержания наполнителя до и после облучения УФ-излучением на воздухе (рис. а-в) позволяет говорить, что для всех смесевых композиций характер зависимостей модуля упругости, напряжения при изгибе и относительной деформации при изгибе от соотношения компонентов после воздействия УФ-излучения в целом аналогичен подобным зависимостям немодифицированных образцов.



а – зависимость напряжения при изгибе, б – модуля упругости,
в – относительной деформации при изгибе, композиций ПВДФ-СВ до (1) и после (2) воздействия УФ-излучения на воздухе при 40 °С и композиций ПВДФ- АСМ до (3) и после (4) воздействия УФ-излучения на воздухе при 40 °С от содержания неорганического наполнителя в смеси

Было показано, что в большинстве случаев увеличение содержания наполнителя более 2 % мас. приводит к более существенному ухудшению физико-механических свойств композита, подвергнутого воздействию УФ-излучения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hussein I.A. Rheological investigation of the influence of molecular structure on natural and accelerated UV degradation of linear low density polyethylene // Polymer Degradation and Stability. 2007. Vol. 92, No. 11. P. 2026-2032.

2. Шляпинтох В.Я. Фотохимические превращения и стабилизация полимеров. Москва: Химия, 1979.

3. Bazunova M.V., Salikhov R.B., Zaharov V.P. Accelerated climatic aging of polymer composite materials based on polypropylene and aluminum oxide // Letters on Materials. 2021. Vol. 11, No. 4 (44). P. 397-402. DOI 10.22226/2410-3535-2021-4-397-402.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ФИКСИРОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ПОМОЩЬЮ КРИВОШИПНО-ПОЛЗУННОГО МЕХАНИЗМА ДЛЯ СТАНЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАМЕНЫ АКБ БПЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ 3-D ПЕЧАТИ

К.П. Пачколин
Научный руководитель: Тимофеев М.Н.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В статье рассказывается о макетировании устройства позволяющего осуществить фиксирование АКБ БПЛА в крайнем положении слота с помощью кривошипно-ползунного механизма с применением аддитивных технологий.*

Ключевые слова: *аддитивные технологии, макетирование, беспилотные технологии*

Рынок БПЛА на данный момент является одним из рынков с наиболее быстрыми темпами развития. Одной из главных проблем, существующих в данной области, является создание системы, обеспечивающей беспрерывный полёт летального аппарата.

Решением этой проблемы может стать станция, которая в автоматическом режиме производит замену аккумуляторных батарей в дронах. Однако в ходе разработки конструкции, которая позволит решить данную проблему возник вопрос осуществления точного позиционирования летального аппарата по отношению к приводу, производящему замену АКБ. В ходе разработки была создана конструкция, позволяющая осуще-

ствить фиксирование АКБ БПЛА в крайнем положении слота с помощью кривошипно-пазунного механизма (рис. 1)

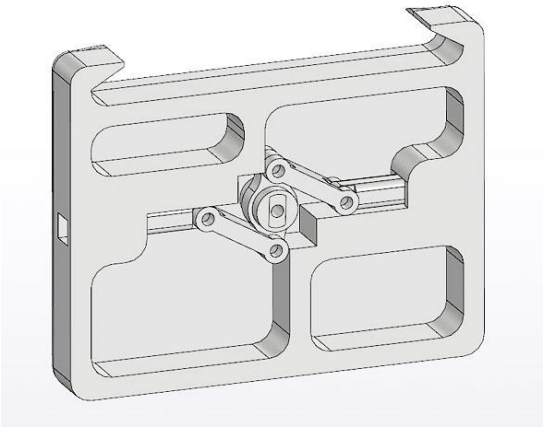


Рис. 1. КП механизм

Также был спроектирован фиксатор, контактирующий с толкателем для произведения поворота механизма и выхода засова из фиксирующих пазов слота АКБ (рис. 2).

Захват осуществлялся при помощи конструкции захвата и перемещения. Диск подводился к аккумулятору, после чего поворачивался на 90° и входом его выступов в ответные пазы на АКБ.

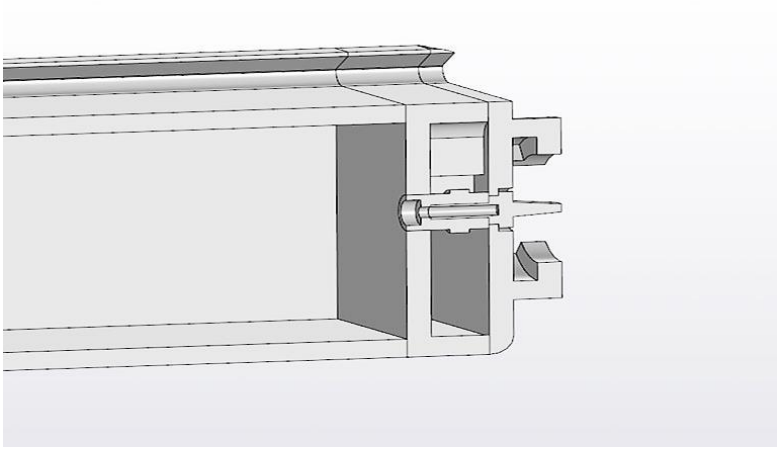


Рис. 2. Фиксатор

В итоге была разработана конструкция АКБ БПЛА, необходимая по габаритам, со всеми необходимыми функциями (рис. 3).

Каждый элемент был создан в качестве 3D-модели в программе Компас 3D v23, затем напечатан на 3D-принтере.

Готовые модели в ходе проверки обеспечили функционирование механизма и дали необходимую точность работы механизма. 3-D печать позволила провести тесты устройства, выявить недостатки за короткий про-

межуток времени и без применения более дорогих материалов, что облегчило и ускорило процесс разработки.

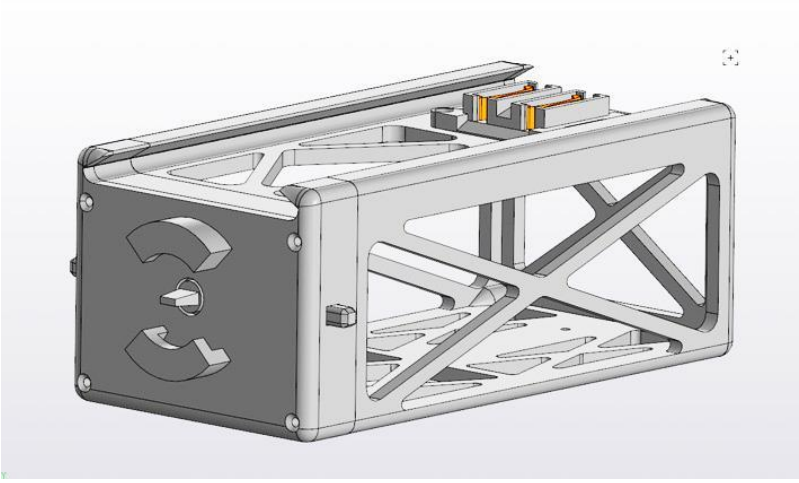


Рис. 3. АКБ БПЛА

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Беспилотные летательные аппараты: теория и практика применения / под ред. Ю.С. Попова. Москва: Изд-во МАИ, 2018. 423 с.

2. Проектирование и эксплуатация беспилотных летательных аппаратов / под ред. Н.П. Пирогова. Москва: Изд. дом МЭИ, 2020. 372 с.

3. Использование беспилотных летательных аппаратов в различных отраслях народного хозяйства / под ред. В.В. Соколова. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. 356 с.

4. Линейные электроприводы: теория, проектирование и применение / под ред. В.В. Клокова. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 432 с.

ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ Ni-СОДЕРЖАЩИХ МУЛЬТИФЕРРОИЧНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ ФЕРРИТА ВИСМУТА, ЛЕГИРОВАННОГО СЕГНЕТОАКТИВНЫМИ КАТИОНАМИ Ti4+, Nb5+ И W6+

Д.О. Поподько
Научный руководитель: д.х.н., доцент Лисневская И.В.

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

Аннотация. *В работе представлены результаты рентгенофазовых исследований твердых растворов* $BiFe_{1-x}(Ti_{1/2}Ni_{1/2})_xO_3$ *(x = 0-0,15),* $BiFe_{1-x}(Nb_{1/3}Ni_{2/3})_xO_3$ *(x = 0,01-0,11),* $BiFe_{1-x}(W_{1/4}Ni_{3/4})_xO_3$ *(x = 0,01-0,09).*

Ключевые слова: *мультиферроики, феррит висмута*

Феррит висмута ($BiFeO_3$, BFO) имеет ромбоэдрически искажённую структуру перовскита (пространственная группа R3c [1, 2]) и представляет собой важный материал, обладающий сочетанием магнитных и электрических свойств благодаря своей тому, что в его состав входят сегнето- и магнитоактивные катионы висмута и железа [1, 3]. Он является редким примером высокотемпературных мультиферроичных материалов с температурами сегнетоэлектрического и антиферромагнитного переходов 1023 и 640 K соответственно [1, 2]. $BiFeO_3$ и твердые растворы на его основе представляют большой интерес в различных отраслях науки и техники для создания запоминающих элементов, сенсоров, переключающих устройств и др. Применение BFO в спинтронике обусловлено возможностью контроля направлений спинов, что позволяет разрабатывать новые подходы к хранению и обработке информации [1]. Также феррит висмута может найти применение в биомедицине благодаря чувствительности к изменениям электрических полей в разработке различных высокочувствительных биодатчиков. Из-за узкой ширины запрещённой зоны, которая составляет 2,1-2,7 эВ, материалы на основе BFO выглядят очень привлекательными и в фотокатализе [4].

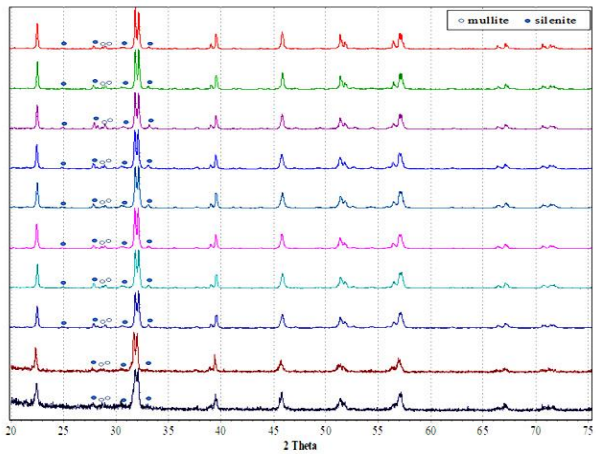
Несмотря на то, что феррит висмута является многообещающим материалом в различных сферах, есть много сложностей в процессе синтеза BFO, поскольку это метастабильное соединение, которое подвергается перитектическому разложению выше температуры 850 °C [1, 3] на более стабильные соединения со структурой муллита $Bi_2Fe_4O_9$ и силленита $Bi_{25}FeO_{39}$ [3, 2]. Этому способствует также летучесть висмута, что приводит к нарушению стехиометрии и образованию вторичных фаз, загрязняющих целевой продукт.

Для стабилизации структуры и улучшения свойств BFO обычно используют легирование другими катионами сходного радиуса с ионами, входящими в состав феррита висмута. В литературных источниках описано множество исследований о легировании $BiFeO_3$ катионами лантаноидов (Ln^{3+}) по позициям висмута, в которых утверждается, что это существенно влияет на структуру и свойства мультиферроика [5-8], улучшая как магнитные, так и пьезоэлектрические параметры материала.

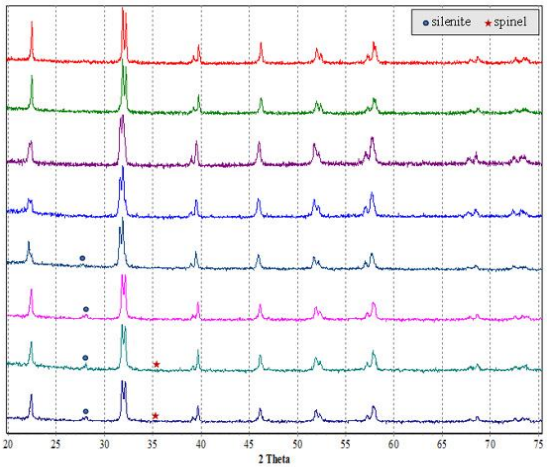
Легирование по подрешётке Fe описано не так обширно. В настоящей работе, которая является продолжением исследований, начатых в [9], представлены результаты рентгенофазовых исследований Ni-содержащих твердых растворов на основе феррита висмута. Твердые растворы $BiFe_{1-x}(Ti_{1/2}Ni_{1/2})_xO_3$ (x = 0-0,15), $BiFe_{1-x}(Nb_{1/3}Ni_{2/3})_xO_3$ (x = 0-0,11), $BiFe_{1-x}(W_{1/4}Ni_{3/4})_xO_3$ (x = 0,01-0,09) получали методом твердофазного синтеза при температуре 780-800 °C (6-8 часов) с промежуточной перешихтовкой, из синтезированных порошков спекали керамику при температуре 800-840 °C в течение 2 часов в воздушной атмосфере. Рентгенофазовый анализ (РФА) выполняли по методу порошка на дифрактометре ARL

X'TRA в CuK_α излучении. С целью определения параметров элементарных ячеек проводили съемку порошков в смеси с крупнокристаллическим Al_2O_3 в качестве эталона и далее проводили уточнение параметров элементарных ячеек при помощи компьютерной программы CELREF [10].

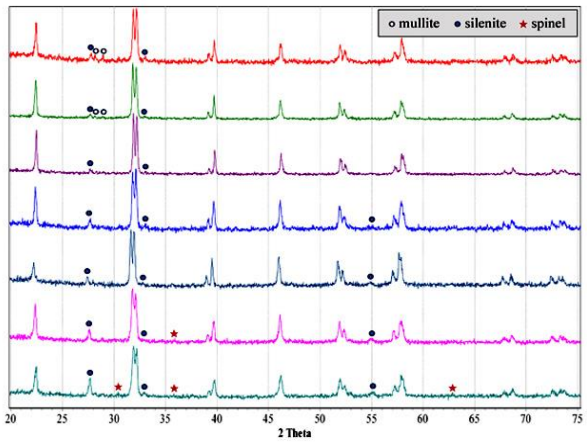
На рис. 1а приведены порошковые дифрактограммы образцов системы $BiFe_{1-x}(Ti_{1/2}Ni_{1/2})_xO_3$ при x = 0,01-0,15. Во всем диапазоне x образуются перовскитоподобные ромбоэдрически искаженные твердые растворы с незначительным содержанием муллита $Bi_2Fe_4O_9$ и силенита $Bi_{25}FeO_{40}$. Далее на рис. 1б приведены рентгеновские профили образцов $BiFe_{1-x}(Nb_{1/3}Ni_{2/3})_xO_3$ при x = 0,01-0,11. Легирующая добавка $(Nb_{1/3}Ni_{2/3})^{3+}$ стабилизирует структуру перовскита с ромбоэдрическим искажением элементарной ячейки: вплоть до x = 0,04 образцы вообще не содержат посторонних фаз, далее при $x \geq 0{,}05$ появляется незначительная примесь силенита, интенсивность рефлексов которой с увеличением x немного повышается. При x = 0,09-0,11 на дифрактограммах появляются едва заметные пики фазы со структурой шпинели на основе $NiFe_2O_4$. Таким образом, можно считать, что растворимость катиона $(Nb_{1/3}Ni_{2/3})^{3+}$ в Fe-подрешетке феррита висмута ограничивается значением x = 0,09.



а



б



в

Рис. 1. Порошковые дифрактограммы образцов:
а – $BiFe_{1-x}(Ti_{1/2}Ni_{1/2})_xO_3$ (x = 0-0,15)
б – $BiFe_{1-x}(Nb_{1/3}Ni_{2/3})_xO_3$ (x = 0,01-0,11)
в – $BiFe_{1-x}(W_{1/4}Ni_{3/4})_xO_3$ (x = 0,01-0,09)

Рис. 1в иллюстрирует данные РФА для образцов $BiFe_{1-x}(W_{1/4}Ni_{3/4})_xO_3$ (x = 0,01-0,09). При x = 0.01 наряду с пиками фазы ромбоэдрически искаженного перовскита наблюдаются рефлексы муллита и силенита, но уже при x = 0,02-0,03 пики $Bi_2Fe_4O_9$ практически полностью подавляются, при этом интенсивность рефлексов силенита заметно возрастает, кроме того, при x = 0,07 обнаруживаются небольшие по интенсивности рефлексы фазы шпинели с параметром, близким к $NiFe_2O_4$. Итак, вхождение смешанного катиона $(W_{1/4}Ni_{3/4})^{3+}$ в B-подрешетку структуры феррита висмута по сравнению с легирующими добавками $(Ti_{1/2}Ni_{1/2})^{3+}$ и $(Nb_{1/3}Ni_{2/3})^{3+}$ наиболее затруднено. Вероятно, это связано с повышенной стабилизацией катионами W^{6+} фазы со структурой силленита, т. к. по данным РФА рефлексы, принадлежащие данной фазе, хорошо соответствуют $Bi_{14}W_2O_{27}$ (ICDD, pdf #39-0061). В свою очередь, переход вольфрама в состав данной фазы ввиду возникающего зарядового дисбаланса препятствует вхождению никеля в структуру перовскита, вследствие чего образованию примеси силленита уже при x > 0,05. Таким образом, растворимость катиона $(W_{1/4}Ni_{3/4})^{3+}$ в B-подрешетке $BiFeO_3$ ограничивается значением x = 0,05.

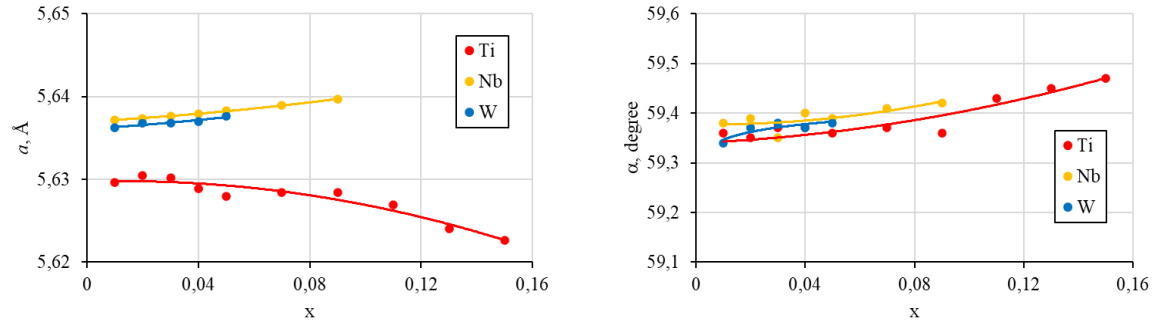


Рис. 2. Параметры элементарных ячеек твердых растворов $BiFe_{1-x}(Ti_{1/2}Ni_{1/2})_xO_3$, $BiFe_{1-x}(Nb_{1/3}Ni_{2/3})_xO_3$ и $BiFe_{1-x}(W_{1/4}Ni_{3/4})_xO_3$

По данным РФА были оценены параметры элементарных ячеек образцов трех описываемых систем в установленных пределах существования твердых растворов. В целом они согласуются со значениями ионных радиусов замещаемого и замещающих катионов [11], которые при координационном числе 6 составляют $R(Fe^{3+})$ = 0,785 Å, $R((Ti_{1/2}Ni_{1/2})^{3+})$ = 0,787 Å, $R((Nb_{1/3}Ni_{2/3})^{3+})$ = 0,813 Å, $R((W_{1/4}Ni_{3/4})^{3+})$ = 0,808 Å.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Scott G.C., James F. Adv. Mater., 2009, 21, 2463.
2. Silva J., Reyes A., Esparza H. Integr. Ferroelectrics, 2011, 126, 47.
3. Lu J., Qiao L.J., Fu P.Z., Wu Y.C. Cryst. Growth, 2011, 318, 936.
4. Gao T., Chen Z., Huang Q. et al. Mater. Sci., 2015, 40, 97.
5. Iorgu A.I., Maxim F., Matei C. et al. Alloys Comp., 2015, 629, 62.

6. Uniyal P., Yadav K.L. Cond. Mater., 2009, 21, 1.
7. Lisnevskaya I., Myagkaya K., Butova V. et al. Ceram. Int., 2020, 46, 6333.
8. Lisnevskaya I., Popod'ko D., Tolstunov M. Ceram. Int., 2023, 49, 26530.
9. http://mill2.chem. ucl.ac.uk/tutorial/lmgp/celref.htm.
10. http://abulafia.mt.ic.ac.uk/shannon/ptable.php.

ВЗАИМОСВЯЗЬ АНОМАЛИЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРОДУКТОВ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ОТЖИГА И ОТПУСКА СТАЛЕЙ ПРИ ~ 650 °С С ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ЖЕЛЕЗА

А.Р. Рафиков, К.Ю. Шахназаров
Научный руководитель: д.т.н., профессор Шахназаров К.Ю.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург

Аннотация. *Относительно природы максимальной пластичности или ударной вязкости при монотонном изменении прочностных свойств продуктов изотермических отжига и отпуска при ~ 650 °С нет единого мнения. Сделана попытка связать максимумы пластичности с превращением в железе, на что указывают тепловые эффекты и аномалии его свойств при ~ 650 °С.*

Ключевые слова: *отжиг, прочность, пластичность, вязкость, карбид*

Максимальная пластичность или ударная вязкость достигаются, когда температуры перлитного превращения $t_П$ или высокого отпуска $t_О$ равна ~ 650 °С. Это аномально, так как в обоих случаях снижению прочностных свойств или твердости соответствует уменьшение пластичности или вязкости, то есть охрупчивание [1-3].

Охрупчивание при $t_О$ > 650 °С описано в 1915 г.: «Наиболее благоприятным в смысле получения хорошего сжатия при разрыв оказался отпуск при 650 °С [6]. Но по поводу природы охрупчивания имеются взаимоисключающие суждения: огрубление карбидов по границам зерен [2] или «увеличение размеров кристалликов α-железа» [3]. Наиболее взвешенная позиция, на наш взгляд, у А.П. Гуляева, показавшего зависимость ψ до $t_О$ ~ 680 °С с максимумом при $t_О$ ~ 640 °С, а монотонные зависимости $\sigma_В$, $\sigma_{0,2}$, НВ и δ до $t_О$ ~ 640 °С [4]. Можно предполагать, что подход А.П. Гуляева обусловлен отсутствием версии природы охрупчивания при понижении твердости и прочности.

Охрупчивание при $t_П$ > 650 °С в работах [2] и [5] не комментируется, а Э. Гудремон сводит его к дисперсности карбидов [1]. Это вызывает возражение, так как «оценка свойств стали преимущественно при помощи какой-либо одной из структурных составляющих стали не является достаточной» [7]. «Значение свойств ферритной составляющей, помимо дисперсности карбидной фазы подчеркивается в работах С.С. Штейнберга» [7].

Поскольку аномально высокая пластичность продуктов изотермических отжига и отпуска формируется при ~ 650 °С, то обратимся к основе стали – ферриту (почти чистому железу).

У железа при ~ 650 °С:

– минимум числа Лоренца [8];

– максимум коэффициента линейного расширения [1, 9];

– начало скачкообразного роста теплоемкости (данные Холецко, а также Кубашевского) [9] и максимальной магнитной проницаемости [10].

Скачкообразное изменение свойств, согласно Таммана [1], является признаком превращения.

Признаком превращения в железе являются тепловые эффекты при ~ 650 °С. Они установлены: Осмондом в 1887 и 1895 годах [11], Робертсом-Аустеном в 1899 году [12], Карпентером и Киллингом в 1904 году [12]. На термограмме 1964 года Н.А. Недумова и В.К. Григоровича при ~ 650 °С отчетливый изгиб [9].

Если эти признаки превращения в железе значимы, то с ним можно связать аномально высокую пластичность продуктов изотермических отжига и отпуска при ~ 650 °С.

В заключении приведем названные «не тривиальными» результаты, опубликованные в МиТОМ в 2009 году для сталей с 0,04-0,18 % С после контролируемой прокатки. Если пренебречь тремя из 33-х экспериментальных точек, то увеличение $\sigma_{0,2}$ с ~ 370 до ~ 550 МПа повышает KCU или KCV минимум в 2 раза [13]. Подобное одновременное повышение наблюдается для $\sigma_В$, $\sigma_{0,2}$, HRC, σ_{-1}, δ и ψ для эвтектоидной стали (0,78 % С) из классической работы Гензамера и др. 1942 года [1-3]. Это предполагает ведущую роль не числа и дисперсности карбидов, а α-твердого раствора – почти чистого железа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гудремон Э. Специальные стали: в 2 т. Москва: Металлургиздат, 1959. Т. 1. 952 с.

2. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. 3-е изд. Москва: Металлургия, 1978. 392 с.

3. Мороз Л.С. Тонкая структура и прочность стали. Москва: Металлургиздат, 1957. 160 с.

4. Бажин В.Ю. Современный взгляд на аномалии в группах металлов Периодической системы Д.И. Менделеева // Записки Горного института. 2020. Т. 239. С. 520-527.

5. Перлит в углеродистых сталях / В.М. Счастливцев, Д.А. Мирзаев и др. Москва: УРО РАН, 2006. 311 с.

6. Беляев Н.И., Гудцов Н.Т. О пределе упругости стали // Журнал Русского Металлургического общества. 1914. Ч. 1. № 3. С. 332-414.

7. Бокштейн С.З. Структура и механические свойства легированной стали. Москва: Металлургиздат, 1954. 280 с.

8. Powell R.W. Further measurement of the thermal and electrical conductivity of iron at high temperatures // The proceedings of the physical society. 1939. V. 51. Part 3. № 285. P. 407-418.

9. Григорович В.К. Электронное строение и термодинамика сплавов железа. Москва: Наука, 1970. 292 с.

10. Бозорт Р. Ферромагнетизм. Москва: Изд-во иностр. лит., 1956. 784 с.

11. Benedicks C. On allotropy in general and that of iron in particular // Jorn. Iron and steel inst. 1912. V. 86. P. 242-290.

12. Тыркель Е. История развития диаграммы железо – углерод. Москва: Машиностроение, 1968. 280 с.

АНАЛИЗ ТИПОВ НАНОМАТЕРИАЛОВ И ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО СФЕРАМ ПРИМЕНЕНИЯ

Н.А. Рупшис
Научный руководитель: к.э.н., доцент Рысина Е.И.

Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Смоленск

Аннотация. *В статье рассматривается актуальность использования нанотехнологий. Проанализированы и распределены между наиболее подходящими сферами применения основных типов наноматериалов.*

Ключевые слова: *наноматериалы, нанотехнологии, сферы применения*

В настоящее время нанотехнологии используются в жизни людей повседневно. Они подразумевают совокупность методов и приёмов, которые позволяют контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, обладающие принципиально новыми качествами [1].

Нанотехнологии применяются и развиваются в различных сферах: медицине, энергетике и окружающей среде, электронике и ИТ, производ-

стве и промышленности [2]. Их значимость проявляется как в производстве новых материалов, обладающих уникальными свойствами, так и в революционных решениях во многих направлениях.

В сфере медицины подобные задачи решаются с применением наночастиц, которые позволяют точно доставлять лекарственные препараты непосредственно в поражённые клетки. Кроме того, разработка наносенсоров даёт возможность фиксировать даже незначительные изменения биохимических процессов, что способствует раннему выявлению болезней. В сфере энергетики и окружающей среды нанотехнологии способствуют разработке более продуктивных источников энергии. Кроме того, с их помощью создаются нанофильтры и нанокатализаторы, которые эффективно применяются для очищения воды и воздуха, что является важным экологическим фактором.

В сфере электроники и ИТ нанотехнологии применяются для разработки транзисторов и микросхем, позволяющих значительно повысить производительность электронных устройств и понизить их энергозатраты.

В сфере производства и промышленности внедрение нанотехнологий позволяет создавать материалы и продукты, с новыми характеристиками. Покрытия, произведённые на основе наноматериалов, способны обеспечивать защиту от коррозии, загрязнений и воздействия биологических факторов.

Наноматериалы содержат структурные элементы, геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм, и обладают качественно новыми свойствами [1].

Выделяют 4 основных типа наноматериалов [3]:

– Материалы на основе углерода.

– Полупроводники.

– Дендримеры. Полимеры наноразмера, использующиеся как катализаторы в химической промышленности.

– Композиты. Материалы, изготавливающиеся за счёт соединения наночастиц или наночастиц с наноматериалами.

В табл. 1 представлено сравнение наноматериалов по различным критериям.

Таблица 1

Сравнение наноматериалов по критериям

Тип	Ключевые свойства	Экологическая/ биобезопасность	Стоимость/ производство
Материалы на основе углерода	Высокая прочность, электропроводность, термостабильность, восстановление после деформации	Возможна биосовместимость, но есть данные о токсичности при вдыхании и накоплении в организме	Производство дорогостоящее, но развивается массовое промышленное изготовление

Окончание табл. 1

Тип	Ключевые свойства	Экологическая/ биобезопасность	Стоимость/ производство
Полупроводники	Оптические и электрические свойства, регулируемая ширина запрещённой зоны, яркая флуоресценция	Возможна токсичность (особенно для тяжелых металлов, например, CdSe), требуется контроль безопасности	Зависит от состава: кремний – дешёвый, CdSe – дороже, масштабируемость хорошая
Дендримеры	Монодисперсность, функционализация поверхности, разветвленная структура	Обычно биосовместимы, низкая токсичность, биоразлагаемость зависит от структуры	Сложный и дорогой синтез, ограниченная масштабируемость
Композиты	Сочетание свойств компонентов, высокая прочность	Биобезопасность зависит от матрицы и наполнителя, возможна инертность	Хорошая масштабируемость, стоимость зависит от наполнителя и матрицы

В зависимости от критериев, представленных в табл. 1, можно сделать выводы о том, какой наноматериал наиболее подходит к конкретной сфере. Данные выводы представлены в табл. 2.

Таблица 2

Распределение наноматериалов по сферам применения

Сфера	Наноматериал	Полезные свойства	Примеры применения
Медицина	Дендримеры	Точный контроль свойств, биосовместимость	Таргетная доставка лекарств, контрастные вещества для МРТ и КТ, антибактериальные препараты, регенерация тканей
Энергетика и окружающая среда	Материалы на основе углерода	Высокая электропроводность, площадь поверхности	Эффективные солнечные элементы, ёмкие аккумуляторы и суперконденсаторы, адсорбенты для очистки воды, катализаторы
Электроника и ИТ	Полупроводники	Управляемые электронные свойства	Быстрые транзисторы, нанопровода и межсоединения, энергонезависимая память
Производство и промышлен-ность	Композиты	Прочность, износостойкость, адаптивность свойств	Сверхпрочные конструкции (авиация, автомобилестроение), износостойкие покрытия, самовосстанавливающиеся материалы

Таким образом, анализируя табл. 2, можно сделать вывод о том, что дендримеры наиболее подходят для адресной доставки лекарств и терапев-

тических применений. Углеродные наноматериалы идеальны для повышения эффективности солнечных элементов и накопления энергии. Полупроводники остаются основой современной электроники, так как они позволяют создавать транзисторы и другие ключевые компоненты. Композиты являются наиболее эффективными наноматериалами для производства и промышленности за счёт своих полезных свойств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Балоян Б.М., Колмаков А.Г., Алымов М.И., Кротов А.М. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технология получения // Международный университет природы, общества и человека «ДУБНА» филиал «УГРЕША», 2007. 125 с. С. 12. URL: https://old.sgu.ru/sites/default/files/method_info/2020/b.m._baloyan_i_dr._nanomaterialy.pdf (дата обращения: 26.04.2025).

2. Пять направлений развития нанотехнологий // СИРИУС. URL: https://siriusmag.ru/articles/2723-pat-trendov-i-budusee-nanotehnologij/ (дата обращения: 26.04.2025).

3. Что такое нанотехнологии и где они используются // Совкомблог URL: https://journal.sovcom-bank.ru/tehnologii/chto-takoe-nanotehnologii-i-gde-oni-ispolzuyutsya (дата обращения: 26.04.2025).

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МАЛОШУМНОГО ВОЗДУШНОГО ВИНТА МАЛОГАБАРИТНЫХ БАС С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ 3-D-ПЕЧАТИ

А.Ю. Русяев

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В статье рассказывается о макетировании малошумного воздушного винта с применением аддитивных технологий.*

Ключевые слова: *аддитивные технологии, макетирование, беспилотные технологии*

Введение

Аддитивные технологии представляют собой инновационный подход к производству, который радикально меняет традиционные методы разработки изделий. Эти технологии позволяют формировать детали с высокой точностью и возможностью создания сложных геометрических форм [2, 6].

В последнее время аддитивные технологии находят применение в различных отраслях, включая аэрокосмическую, автомобильную и медицинскую, благодаря своей способности ускорять процесс разработки и сокращать затраты на производство.

Одной из сфер, где аддитивные технологии показывают свой потенциал, являются беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Дроны с каждым днем становятся все популярнее в самых различных областях – от простого развлечения до доставки посылок на дом [4].

На данный момент БПЛА все чаще используются в различных сферах и уже могут: анализировать местность, автоматически вылетать на разведку территории, заниматься мониторингом трубопроводов, автодорог, доставлять груз и заниматься сельским хозяйством [3-5]. С каждым днем перспективы дронов возрастают, и из этого вытекает проблема издаваемого шума.

Целью данной работы является оптимизация процессов производства воздушного винта со сложной геометрией лопасти для уменьшения производственных затрат и снижения уровня шума, создаваемого малогабаритными беспилотными летательными аппаратами.

Разработка малошумного воздушного винта

При разработке геометрии лопасти воздушного винта необходимо учитывать: тип винта, условия эксплуатации, требования к производительности (подъемная сила, тяга, КПД и издаваемый шум).

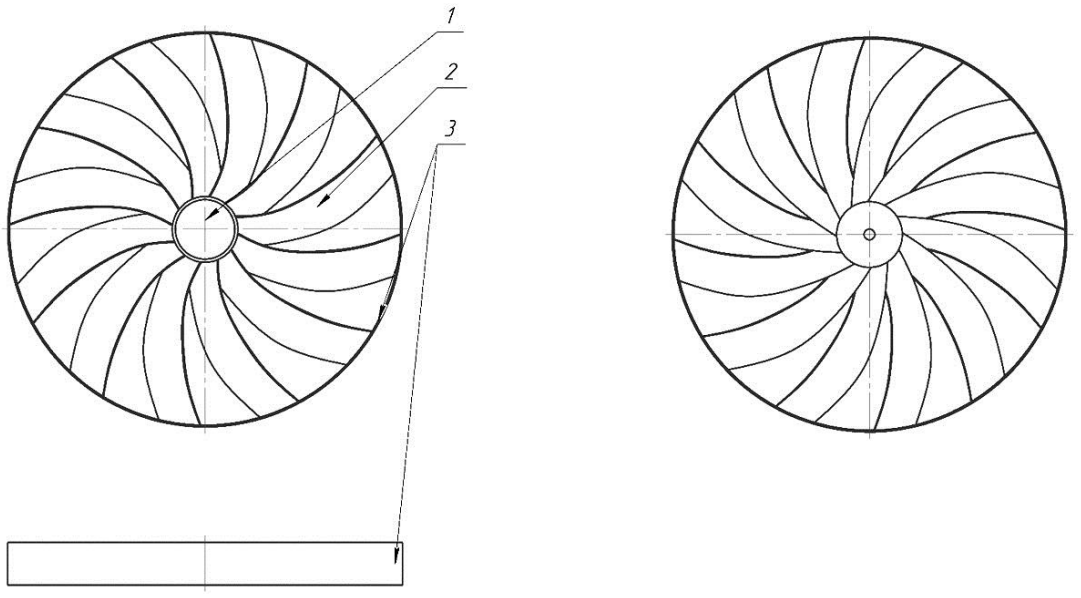


Рис. 1. Двенадцатилопастной винт:
1 – центральная втулка; 2 – лопасть; 3 – внешний кожух винта

Выбор винта (рис. 1) с большим количеством лопастей и большим шагом винта обусловлен несколькими факторами, связанными с требова-

ниями к производительности, аэродинамическими характеристиками и условиями эксплуатации.

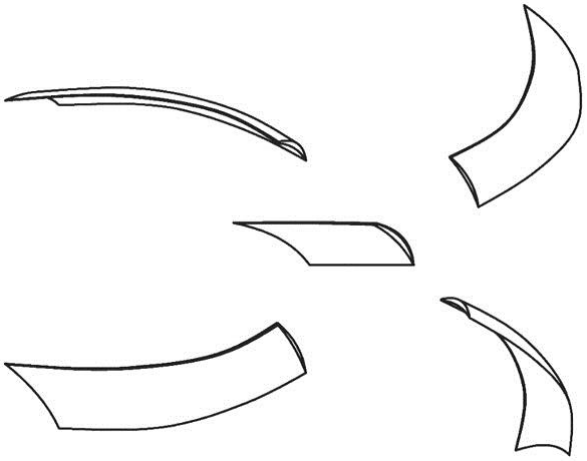


Рис. 2. Лопасть двенадцатилопастного винта

Геометрия лопасти (рис. 2) винта (с большим количеством лопастей и большим шагом) является результатом тщательного проектирования, направленного на достижение оптимальных аэродинамических характеристик. Она обеспечивает баланс между подъемной силой, оборотами, эффективностью и стабильностью, что делает такие винты подходящими для множества применений в авиации и других областях.

Рис. 3. Напечатанный на 3D-принтере двенадцатилопастной винт

В результате работ в программе Компас 3D была получена твердотельная модель (рис. 3), которая была распечатана на 3D-принтере. Готовая модель имеет дефекты, их влияние невелико и не повлияло на сделанные выводы в эксперименте.

Специально для исследования данного винта был собран стенд для измерения характеристик винтомоторной группы (ВМГ) (рис. 4) для замера оборотов, шума и тяги винта.

Для измерения оборотов использовался специальный лабораторный датчик оборотов ВС 401 с чувствительностью 750 мВ и диапазоном оборотов 0,002…20 000 об/мин. Для измерения издаваемого шума воздушным винтом использовался лабораторный микрофон. Для замера тяги винта использовался статично закрепленный лист плотной бумаги на расстоянии 300 мм от нижней кромки винта.

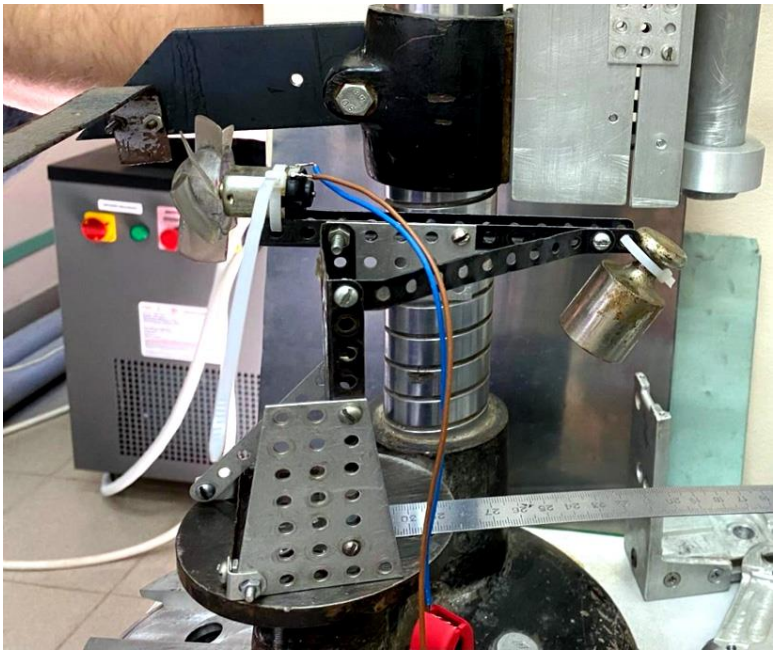


Рис. 4. Стенд для измерения характеристик винтомоторной группы

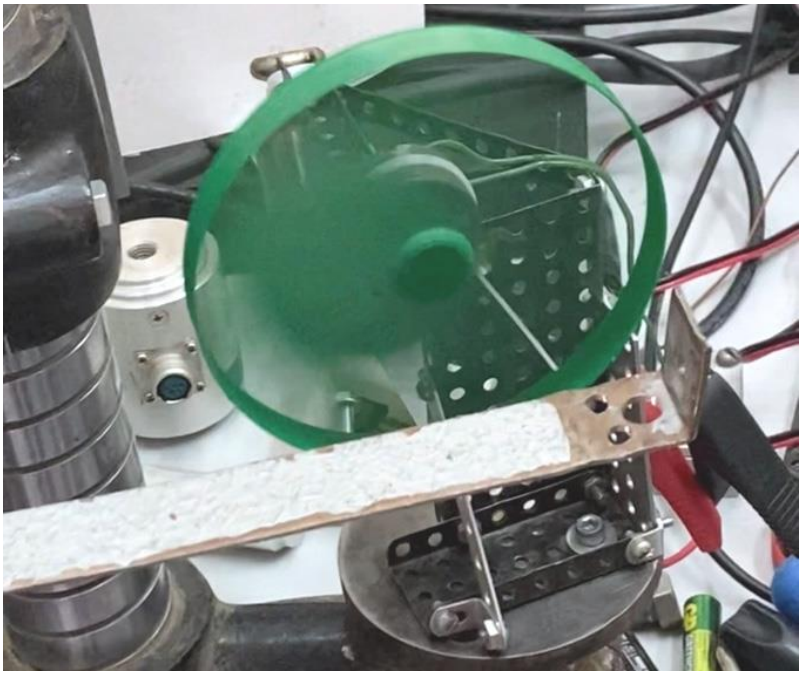


Рис. 5. Измерение напечатанного воздушного винта
на стенде для измерения характеристик ВМГ

В ходе эксперимента были выявлены следующие дефекты: овальность, «восьмерка» и неточность отверстия. Данные дефекты не сильно сказываются на проведении опыта, но для готового исполнения необходимо исправить. После сбора данных на шум, обороты и тягу воздушного винта заносим их в таблицу.

Данные, полученные после эксперимента

Испытание двенадцатилопастного воздушного винта			
Обороты, об./мин	Шум, дБ	Тяга, мм	Напряжение, В
2400	70	20-30	12

Заключение

Разработка конструкции воздушного винта с использованием аддитивных технологий открывает новые горизонты в производстве и кастомизации компонентов. Однако, несмотря на доступность данных технологий, полученные изделия могут иметь значительные дефекты, такие как расслоение, поры и несоответствие геометрических параметров заявленной 3D-модели. Эти недостатки, включая овальность и биение при измерениях, могут негативно сказаться на функциональности и эффективности винта.

Тем не менее аддитивные технологии делают процесс создания таких изделий более доступным для широкого круга пользователей. Теперь любой, кто имеет 3D-принтер, может попробовать реализовать свою идею и напечатать винт, что способствует инновациям и экспериментам в данной области. Важно отметить, что для достижения высокого качества и точности печати пользователям необходимо учитывать ограничения и особенности используемых материалов и технологий. Таким образом, аддитивные технологии представляют собой мощный инструмент, который при правильном подходе может привести к значительным улучшениям в производстве воздушных винтов и других сложных компонентов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Что такое дрон и на что он способен? // Drongeek. URL: https://drongeek.ru/novichkam/chto-takoe-dron, свободный. Загл. с экрана.

2. Как 3D-принтеры используются в промышленных исследованиях и разработках // Lider-3D. URL: https://lider-3d.ru/blog/stati/kak-3d-printery-ispolzuyutsya-v-promyshlennykh-issledovaniyakh-i-razrabotkakh-rukovodstvo-po-pokupke/, свободный. – Загл. с экрана.

3. Мамедова А.Г. Наружный осмотр трубопроводов с помощью дронов в тяжелых условиях // Вестник СибГУТИ. 2023. № 1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/naruzhnyy-osmotr-truboprovodov-s-pomoschyu-dronov-v-tyazhelyh-usloviyah/viewer, свободный. – Загл. с экрана.

4. Зубарев Ю.Н. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // ВестникПФИЦ. 2019. №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-v-selskom-hozyai-stve, свободный. Загл. с экрана.

5. Машненков Д.В. Перспективы использования БПЛА в логистике // Научные исследования и разработки. 2021. №4. URL: https:// cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-bpla-v-logistike/viewer, свободный. Загл. с экрана.

6. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2013. 221 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ О ПРОЦЕССАХ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Д.О. Рысин
Научный руководитель: к.т.н. Рысина Е.И.

Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Смоленск

Аннотация. *В статье проведен системный анализ задачи моделирование информации о процессах сложных технических объектов, которую можно характеризовать как «большие данные» (BigData) и которая используется в системе поддержки принятия решений (СППР). На этой основе предложена система оценок, применяемая для рекомендаций по выбору технологии их обработки. Междисциплинарный характер этой задачи определяется разнообразием предметных областей, в которых генерируются BigData.*

Ключевые слова: *система поддержки принятия решений, технические объекты, BigData*

В современных условиях цифровизации промышленности и управления возросла актуальность задач, связанных с моделированием информации о процессах, происходящих в сложных технологических объектах (СТО). Эти процессы характеризуются высокой степенью структурной и поведенческой сложности, многофакторностью, а также нестационарностью и динамическими изменениями параметров, что требует применения новых методологических подходов к моделированию и интеллектуальной обработке информации.

С учетом вышесказанного в настоящем исследовании рассмотрена проблема системного анализа и формализации прагматической ценности информации, циркулирующей в системах поддержки принятия решений (СППР) применительно к СТО. Информационные потоки, формирующиеся в таких объектах, по своим характеристикам относятся к классу BigData и требуют специализированных методов структуризации, оценки и интерпретации. В качестве базового подхода предложено использовать формализм онтологического моделирования и морфологического анализа, реализуемый в рамках функционального моделирования с применением нотации IDEF0 [1].

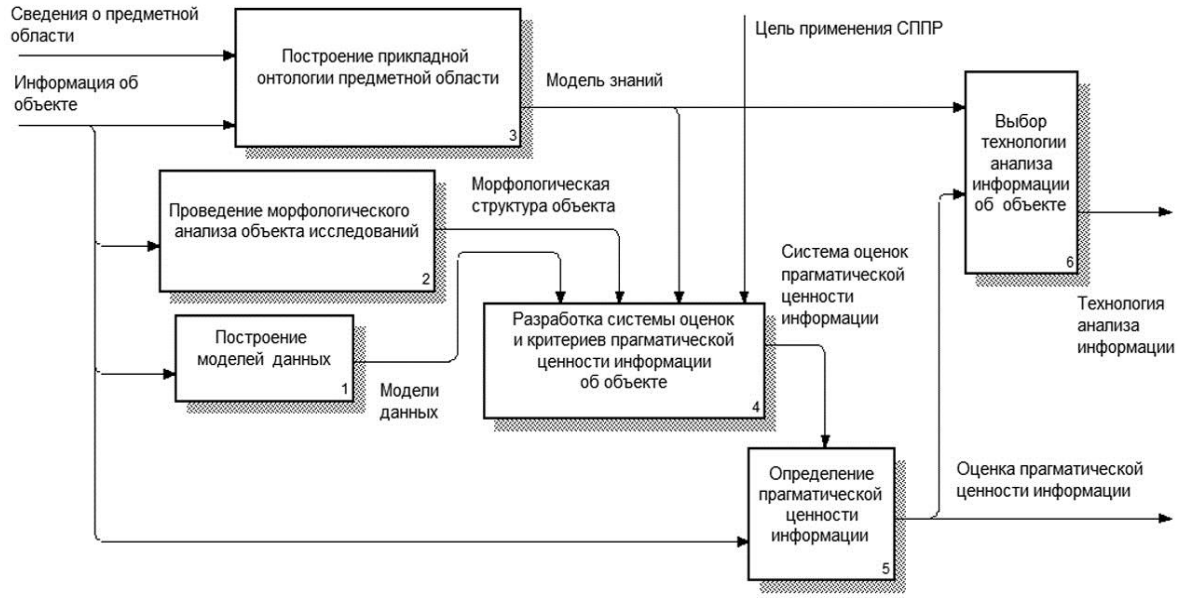
Ключевым элементом разработанной методики является построение функциональной модели процесса определения прагматической ценности информации, при этом входные данные представлены как в виде непосредственных характеристик исследуемого объекта, так и в виде сведений о предметной области. Формируемая прикладная онтология и морфологическое описание объекта позволяют идентифицировать наиболее значимые аспекты информационного взаимодействия, которые впоследствии транслируются в систему оценок. Последняя учитывает такие параметры, как объем информации, степень структурированности, наличие лингвистических неопределенностей и нечеткости, что требует применения механизмов нечеткой логики.

Для количественного выражения прагматической ценности информации использована формула, предложенная М.В. Волькенштейном, в которой оценка определяется на основе объема информации, тезауруса субъекта восприятия и параметров условий восприятия. Это позволяет проводить обоснованный выбор модели интеллектуальной обработки данных на основе соответствия между характеристиками информационного потока и возможностями его интерпретации в рамках СППР.

Особое внимание в работе уделено применению методов искусственного интеллекта, в частности нейросетевых и нейро-нечетких моделей. Установлено, что глубокие нейронные сети (deep learning) обладают наибольшей эффективностью при анализе данных, генерируемых сложными технологическими системами, особенно в контексте применения интернета вещей (IoT), где интенсивность и разнообразие поступающей информации требуют высокой степени автоматизации обработки и интерпретации.

Для формализации процедуры выбора модели обработки данных предложен механизм нечеткого вывода типа Мамдани, в котором входными параметрами являются экспертные оценки онтологии предметной области, объема данных, модели данных и цели применения СППР. Это позволяет построить адаптивную систему выбора, в которой рекомендации формируются на основе правил логического вывода, отражающих междисциплинарную специфику анализа информации о СТО [2].

Основными процедурами системного анализа являются декомпозиция, анализ и синтез. Формальный аппарат представления морфологии объекта и онтологии предметной области вместе с характеристиками информационных потоков, связанных со сложным социально-экономическим или техническим объектом, составляют элементы функциональной модели задачи определения прагматической ценности информации. Для построения указанной функциональной модели была использована нотация IDEF0, декомпозиция контекстной диаграммы которой показана на рисунке.



Функциональная декомпозиция задачи оценки
моделирования информации о сложных технических объектах

Таким образом, проведенное исследование демонстрирует эффективность системного подхода к моделированию информации о процессах сложных технологических объектов с позиций прагматической ценности данных.

Предложенные методы и модели могут быть использованы при проектировании и сопровождении СППР в таких отраслях, как энергетика, химическая промышленность, транспорт, телекоммуникации и другие высокотехнологичные секторы, где критически важна точность, оперативность и обоснованность принимаемых решений [3].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мешалкин В.П., Дли М.И., Пучков А.Ю., Лобанева Е.И. Предварительная оценка прагматической ценности информации в задаче классификации на основе глубоких нейронных сетей // Прикладная информатика. 2021. Т. 16. № 3. С. 9-20.

2. Пучков А.Ю., Лобанева Е.И., Василькова М.А. Программа формирования стека методов искусственного интеллекта при решении прикладных задач // Программные продукты и системы. 2021. Т. 34. № 3. С. 390-398.

3. Lobaneva E., Lazarev A. Access control system with integrated process of two-factor authentication based on neuro-fuzzy networks // CEUR Workshop Proceedings, 2020, 2782, pp. 163-171.

4. Tyutyunnik A.A., Lobaneva E.I. and Lazarev A.I. Contactless access control system for critical objects based on deep learning neural networks // 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russia, 2021. pp. 1-7.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПОЛИТИТАНАТА КАЛИЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО МАРГАНЦЕМ И ХРОМОМ

И.Д. Васильева[1], А.А. Васильева[1], С.И. Саунина[1], Е.В. Третьяченко[2], А.А. Макаров[2], Л.А. Максимова[2]
Научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент Саунина С.И.[1]

[1]Челябинский государственный университет, г. Челябинск
[2]Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В работе рассмотрено изменение фазового состава при термообработке полититаната калия, модифицированного солями марганца и хрома. Представлены результаты рентгенофазового и термического анализов.*

Ключевые слова: *полититанат калия, термообработка, марганец, хром, фазовые превращения*

Полититанат калия (ПТК), имеющий слоистую структуру, является прекрасным прекурсором для создания ряда порошковых керамических композиционных материалов, обладающих уникальными функциональными свойствами. Модифицирование ПТК солями переходных металлов позволяем менять его электрофизические, электрохимические, каталитические свойства [1].

Целью данной работы было изучение фазовых превращений в процессе термообработки (ТО) ПТК, модифицированного солями марганца и хрома в соотношении 2:1.

Модифицирование ПТК проводили в водном растворе солей марганца ($MnSO_4 \cdot 5H_2O$) и хрома ($Cr_2(SO_4)_3 \cdot 6H_2O$) при соотношении компонентов

1:2 (из расчета 0,01 и 0,02 моль солей на 10 г ПТК соответственно). pH суспензии поддерживали на уровне 10,0±0,5 путём добавления раствора гидроксида калия. Полученную систему перемешивали в течение 2 часов. Затем осаждённый продукт трижды промывали дистиллированной водой и сушили в термошкафу при температуре 60 °C.

Термические измерения проводили на синхронном термическом анализаторе STA 449 F5 Jupiter в интервале температур от 30 до 1100 °C, скорость нагрева образца составляла 10 град/мин.

Съёмку исследуемых образцов проводили на рентгеновском дифрактометре Bruker Advance D8. Фазовый состав образца определяли с применением программного обеспечения «EVA» и картотеки PDF-2.

На рис. 1 представлены результаты термического анализа полученного образца ПТК-Mn/Cr.

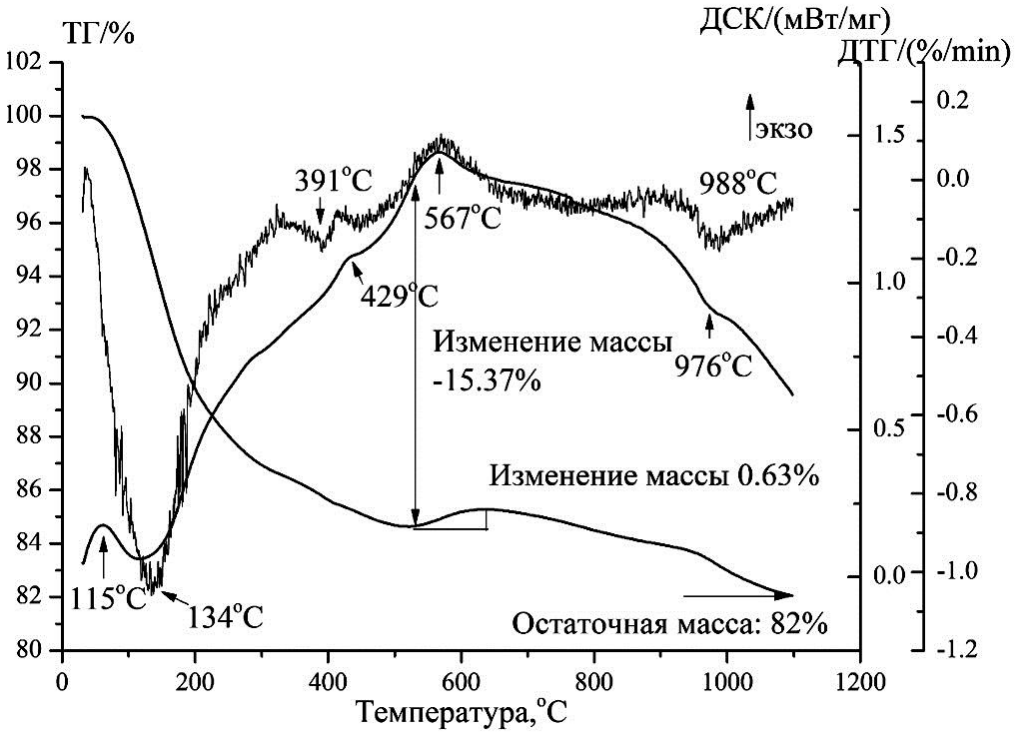


Рис. 1. Термограмма образца ПТК-Mn/Cr

На экспериментальной кривой ДСК выделяются 4 эндоэффекта. Первый эндотермический эффект в интервале температур от ~ 50 до 220 °C с максимумом ~ 115-120 °C связан с удалением физически сорбированной воды. Небольшой эндотермический эффект в интервале ~ 270-300 °C отражает переход $Cr(OH)_3 \rightarrow CrOOH$. Небольшой эндоэффект показывает, что часть хрома легирована в октаэдрические слои оксидов (Mn, Ti). Максимум на кривой ДТГ ~ 391 °C связан с формированием TiO_2(B) [2].

Экзоэффект на кривой ДСК T_{max} ~ 429 °C – формирование кристаллической структуры анатаза. По нашему мнению, экзоэффект (T_{max} ~

567 °С), сопровождаемый увеличением массы образца ~ 0,63 % – начало образование туннельной структуры. При дальнейшем повышении температуры формируются фазы:

$$Mn_2O_3 + 2TiO_2 \rightarrow 2MnTiO_3 + 0{,}5O_2\uparrow$$

$$3Mn_2O_3 \rightarrow 2Mn_3O_4 + O_2\uparrow$$

По данным рентгенофазового анализа после ТО при 900 °С определяются фазы: $K_x(Cr_x/Mn_x,Ti_x)O_x$, $MnTiO_3$. Вероятно наличие шпинели и K_2CrO_4. Наблюдается перераспределение интенсивности основных дифракционных максимумов, характерных для структуры типа голландита $K_x(Cr_x/Mn_x,Ti_x)O_x$ (PDF 01-083-5428 и 00-054-1153). Так, интенсивности дифракционных максимумов с межплоскостным расстоянием d = 3,206 и 2,480Å составляют 80 и 100 % соответственно (рис. 2), что может быть обусловлено наличием текстуры.

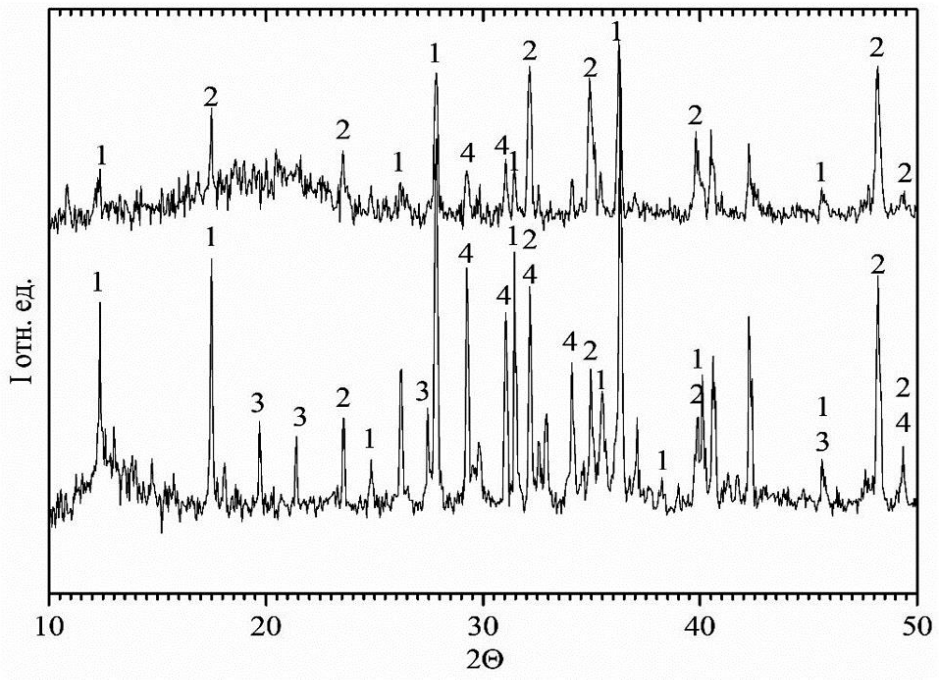


Рис. 2. Фрагмент рентгенограммы образца ПТК-Mn/Cr, ТО а) 900° С, б) 1100° С, где 1 – $K_x(Cr_x/Mn_x,Ti_x)O_x$, 2 – $MnTiO_3$, 3 – K_2CrO_4, 4 – Mn_3O_4

Эндоэффект, сопровождаемый уменьшением массы образца, Т ~ 976 °С (кривая ДСК) и ~ 988 °С (кривая ДТГ) связан с переходом $Mn_3O_4 \rightarrow 3MnO+0.5O_2\uparrow$ и, возможно, отражает плавление фазы K_2CrO_4 ($T_{пл}$ ~ 975 °С).

После ТО при 1100 °С в образце присутствует структура типа голландита $K_x(Cr_x/Mn_x,Ti_x)O_x$. Соотнести ее к структуре на основе Cr или Mn с использованием результатов рентгенофазового анализа не представляется возможным. В области углов 2Θ ~ от 18 до 30° отсутствуют характерные дифракционные максимумы K_2CrO_4 и Mn_3O_4.

Интенсивность дифракционных максимумов, характерных для $MnTiO_3$, уменьшается.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что после высокотемпературной обработки в образце ПТК-Mn/Cr формируется сложная многофазовая система. Так как в образце мы не обнаружили значимого количества соединений с хромом, вероятно, что большая часть хрома легировалась в октаэдрический слой диоксида титана. Так как мы не определили фаз, содержащих хром, то можно предположить, что в образце количество фазы со структурой $K_{1,5}Cr_{1,5}Ti_6O_{16}$ не меньше, чем фазы $KMnTi_3O_8$. Большее мольное содержание марганца не приводит к образованию большего количества фазы $KMnTi_3O_8$ по сравнению $K_{1,5}Cr_{1,5}Ti_6O_{16}$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Modified amorphous layered titanates as precursor materials to produce heterostructured nanopowders and ceramic nanocomposites / A.V. Gorokhovsky, J.I., Escalante-Garcia A.A. Gornakov et al. // Journal of Alloys and Compounds. 2014. V. 586. P. S494-S497. URL: http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.10.054.

2. Interlayer separation in hydrogen titanates enables electrochemical proton intercalation / S. Fleischmann, Y.S. Naresh, N.C. Osti et al. // Journal of Materials Chemistry A. 2020. V. 8. P. 412-421. URL: https://doi.org/10.1039/C9TA11098D.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

А.Е. Бондарев, А.П. Пашинов
Научный руководитель: д.т.н., профессор Сафонов А.О.

Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, г. Воронеж

Аннотация. *Исследования автомобильных покрытий показывают, что в настоящее время лакокрасочные материалы разрабатываются с учетом формы, размера и расположения частиц, стабильности пигмента, однородности образующейся пленки. Показатели качества и механических характеристик внешних и внутренних покрытий зависят от состава смолы, вводимых пигментов, растворителей и добавок. В результате проведенных исследований были разработаны покрытия на базе рутилового пигмента TiO_2. При этом включение наноматериалов в покры-*

тия приводит к повышению эксплуатационных показателей и достижению повышенных механических характеристик, обеспечивающих долговременную защиту металлических поверхностей.

Ключевые слова: *автомобиль, адгезия, блеск, коррозия, краска, сушка, покрытие*

Современные технологии создания покрытий поверхностей характеризуются широким набором методов, которые создают и улучшают показатели поверхности и характеристики применяемых материалов путем модификации покрытий с целью защиты и придания заданных декоративных свойств. Технологии создания покрытий поверхности часто применяются для защиты от коррозии. Следует отметить, что не защищенные поверхности очень подвержены агрессии к внешним воздействиям и не отвечают целям эстетичного внешнего вида. По этой причине для улучшения поверхностных показателей применяемых материалов и продуктов необходимы соответствующие поверхностные покрытия [1].

Современные методы обработки поверхности перед ее покрытием защитными материалами включают подготовку поверхности для дальнейших этапов его нанесения на материалы или детали. Разработка эффективного процесса предварительной обработки поверхности является сложной задачей для требуемого сочетания коррозионных металлических деталей.

Автомобильная промышленность характеризуется значительными достижениями в сфере поверхностных покрытий на основе нанотехнологий [2]. Лакокрасочная промышленность также развивается в нашей стране и за рубежом. В настоящее время покрытие обеспечивает не только улучшение эстетических свойств, но и является средством защиты металлов, полимерных материалов, различных конструкций от коррозии. Многие лакокрасочные предприятия затрачивают огромные средства в научно-исследовательские отделы для проектирования и разработку специальных красок, подходящих для защиты от агрессивной среды. В последнее время было разработано достаточно много новых составов красок для покрытий, но ни один не выполняет все заданные требования в одной формуле лакокрасочного материала [3].

Промышленные многофункциональные покрытия должны обеспечивают необходимую защиту от ветра, высокой температуры, мороза, осадков, а также различных атмосферных загрязнений.

В настоящих исследованиях были рассмотрены несколько типов красок на основе TiO_2 и меламиноформальдегидная смолы. Нанопигментные частицы SiO_2 различного процентного соотношения от 0,5 % до 2,0 % вместе с пигментом TiO_2 применялись для модифицирования алкидно-аминных материалов горячей сушки для создания защиты стальных поверхностей автомобильной техники. При этом в составе красок смола, растворитель и различные добавки оставались постоянными, а изменялось

только соотношение пигментов. Все виды исследуемых красок были нанесены на различные металлические плоские прямоугольные образцы из мягкой стали размером 150 × 75 мм и толщиной 1 мм. Отверждение осуществлялось при температуре 150 °С в течение получаса. Затем после охлаждения до температуры 20 °С были проведены испытания полученных покрытий. Толщина сухой пленки краски формировалась из следующих составляющих: 15-20 микрон грунтовочного слоя, 20-25 микрон первого слоя, 20-25 микрон для второго или верхнего слоя.

При опытах на солевой туман исследуемые панели с покрытием помещались в специальную камеру, в которой постоянно генерировался туман из 3,5 % раствора NaCl при температуре 25 °С. Наблюдение осуществлялось с регулярными интервалами.

Экспресс-испытание на устойчивость к внешним атмосферным воздействиям. Влияние атмосферных воздействий измерялось путем воздействия на исследуемые образцы покрытий по истечении 300, 400, 1400 часов. При испытании покрытий были получены хорошие результаты, которые продемонстрировали успешное применение указанных наноматериалов в составах красок. Они обещает выполнение поставленной задачи требуемого по свойствам покрытия.

Результаты опытов показывают, что с повышением концентрации наноSiO_2 в меламиноформальдегидных смолах замечено непрерывное уменьшение блеска по причине меньшего преломления наночастиц кремния в сравнении с применением диоксида титана TiO_2. Также наблюдалось значительное повышение основных показателей поверхностных покрытий. Исследованные в соляном тумане образцы показали следующую картину: после 1000 часов составы нанесенных на образцы красок с содержанием 1,0 мас.%, 1,3 мас.% нано и 1,8 мас.% наночастиц не корродируют, а другие составы сильно подвергаются коррозии. Этот факт может быть обусловлен большим углом смачивания и сравнительно меньшей скоростью коррозии нано пигментированных красок.

При использовании традиционного пигмента для покрытий применяются частицы микронного размера. При этом в имеющиеся пустоты и отверстия могут попадать вода, грязь и различные инородные включения. По причине такой активности на подложке образуются пузыри, возникает эрозия и коррозия. С другой стороны, краски на основе наночастиц создают поверхностные покрытия, которые плотно покрыты прочными молекулами наночастиц SiO_2.

Диоксид кремния выполняет функцию непроницаемой защиты от внешних воздействий среды. Достаточно прочная связь между молекулами в месте контакта является наиболее необходимой при условии, что образующиеся напряжения внутри покрытия будут не слишком высоки и они не приведут к деградации системы покрытие-подложка. Применяя наноматериалы для модификации красок, можно улучшить качество поверхност-

ных покрытий, благодаря этому срок эксплуатации изделий и отдельных элементов будет увеличен. Применение частиц нанокремнезема повышает поверхностные характеристики покрытий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сафонов А.О., Бондарев А.Е., Манохин С.В. Исследование свойств композитных покрытий на основе Ti-B-C // Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки: сб. материалов III Всерос. молодеж. конф. Саратов, 22-23 мая 2024 г. / под. общ. ред. д-ра техн. наук, доцента А.А. Фомина. Саратов: СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2024. С. 221-223.

2. Schimauder K., Nauemburg D.Recent Progress in Coating Technology for Surface Modification of Automotive Glass // Journal of Non-Crystalline Composites. 2021. № 45 (4). P. 357-364.

3. Сафонов А.О., Бондарев А.Е. Разработка композитных покрытий на основе соединений хрома с заданными характеристиками // Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки: сб. материалов III Всерос. молодеж. конф. Саратов, 22-23 мая 2024 г. / под. общ. ред. д-ра техн. наук, доцента А.А. Фомина. Саратов: СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2024. С. 223-226.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ ИННОВАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЗАЩИТЫ И УСТОЙЧИВОСТИ ПОВЕРХНОСТИ К ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

А.Е. Бондарев, А.П. Пашинов
Научный руководитель: д.т.н., профессор Сафонов А.О.

Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, г. Воронеж

Аннотация. *Инновационные покрытия разрабатываются для лучшей защиты от окружающей среды. Они создают надежную преграду от различных видов разрушения или деградации материалов благодаря имеющимся свойствам самовосстановления. В работе исследовались текущее состояние и ближайшие перспективы инновационных покрытий в широком диапазоне использования, в частности в автомобилестроении, авиационной отрасли, строительстве, производстве электроники и здравоохранении.*

Ключевые слова: *коррозия, материал, металл, покрытие, производство*

Инновационные покрытия в сфере материаловедения могут адаптироваться к ряду необходимых свойств от антикоррозионных и термохромных характеристик до самовосстановления и самоочищения в зависимости от необходимых целей применения [1].

Создавая такие материалы как полимерные композиты, наночастицы и гибридные структуры, инновационные покрытия обеспечивают получение современных решений во многих отраслях промышленности.

Следует отметить, что рынок инновационных покрытий для обеспечения различных потребностей в функциональных материалах быстро увеличивается. Повышение спроса объясняется имеющейся достаточно высокой потребностью в современных материалах, которые должны повышать защиту и обладать рядом заданных свойств.

В настоящее время мировой рынок таких покрытий оценивается в 3,1 млрд долларов США и, по прогнозам, будет неуклонно повышаться до 12,0 млрд долларов США в 2035 году. Конечно, такой прогнозный прогрессирующий рост обусловлен разработкой и внедрением инновационных покрытий в различных отраслях.

Важными свойствами инновационных покрытий должны быть их способность увеличивать срок эксплуатации механизмов, уменьшать время на сервисное обслуживание и обеспечивать дополнительные показатели, которые не имеют традиционные покрытия. Такие передовые материалы имеют большой потенциал для многих отраслей.

Антикоррозионные инновационные покрытия имеют большое значение для снижения степени повреждения окружающей средой металлических деталей, что увеличивает их срок эксплуатации и в ряде случаев безопасность [2]. В медицине антибактериальные инновационные покрытия имеют заданные свойства для предотвращения инфекций на используемых устройствах и поверхностях.

Область применения инновационных покрытий имеет достаточно большое множество вариантов, которые сильно отличаются по используемому механизму и характеру применения [3]. Самовосстанавливающиеся покрытия могут восстанавливать свои начальные характеристики самостоятельно, без внешних воздействий.

В автомобилестроении и авиации такая особенность чрезвычайно важна для полной защиты целостности поверхности. Аналогичным образом работают самоочищающиеся покрытия. Они применяются в сферах, где чистота и оптические характеристики имеют важное значение, например в солнечных батареях и оконных системах.

При этом существует ряд не решенных проблем и значительных препятствий в отношении разработки высокоэффективных инновационных покрытий для применения в различных областях. К ним можно отнести известные проблемы, связанные с созданием промышленных технологий и долговечностью.

Также одной из основных задач является производство инновационных покрытий в необходимых объемах с обеспечением их функциональности. В перспективе критически важными будут производительность и надежность рассматриваемых покрытий в различных влияниях окружающей среды. В этом плане потенциальное влияние на работоспособность «умных» покрытий, содержащих вредные для здоровья компоненты, убедительно свидетельствует о перспективе поиска экологически чистых материалов.

Даже учетом указанных проблем мировой рынок инновационных покрытий в значительной мере имеет огромный потенциал для дальнейшего развития. С повышением срока эксплуатации изделий, снижением расходов на сервисное обслуживание и вкладом в устойчивое развитие путем создания экологически чистых покрытий перспективы становятся достаточно очевидными. Следующее поколение инновационных покрытий будет характеризоваться достижениями в аддитивных технологиях и послойной печати. Они, несомненно, должны обладать заданной способностью к самовосстановлению, защитой от коррозии и требуемым уровнем экологичности.

В рассматриваемой проблеме большую роль играют междисциплинарные практические исследования и научная кооперация между материаловедением, промышленным производством, инженерным проектированием и нанотехнологиями. Такое сотрудничество будет определять решающее значение для преодоления возникающих проблем, обусловленных масштабируемостью, устойчивостью к воздействиям на окружающую среду.

Безусловно, рынок инновационных покрытий уже сейчас готов к значительному росту, а область их применения будет увеличиваться в различных направлениях, в том числе в автомобилестроении, авиационной отрасли, строительстве, бытовой и промышленной электронике. В этой связи акцент на долговечность и экологичность также будет определять ключевую задачу развития рассматриваемого направления научно-практических разработок. При этом исследователи будут сосредоточены на создании нетоксичных, возобновляемых, недорогих и экологически чистых покрытий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Cui G. Fundamental of smart coatings and thin films: synthesis, deposition methods, and industrial applications / G. Cui, S. Wang, J. Lin, W. Xing // Prog Org Coat. 2022. № 11. P. 236-247.

2. Сафонов А.О. Исследование свойств композитных покрытий на основе Ti-B-C / А.О. Сафонов, А.Е. Бондарев, С.В. Манохин // Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки: сб. матери-

алов III Всерос. молодежной конф. Саратов, 22-23 мая 2024 г. / под. общ. ред. д-ра техн. наук, доцента А.А. Фомина. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2024. С. 221-223.

3. Сафонов А.О. Разработка композитных покрытий на основе соединений хрома с заданными характеристиками / А.О. Сафонов, А.Е. Бондарев // Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки: сб. материалов III Всерос. молодежной конф. Саратов, 22-23 мая 2024 г. / под. общ. ред. д-ра техн. наук, доцента А.А. Фомина. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2024. С. 223-226.

РАЗРАБОТКА ПОКРЫТИЙ ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ И РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ, ПОДВЕРГАЮЩИХСЯ МЕХАНИЧЕСКИМ НАГРУЗКАМ

А.Е. Бондарев, А.П. Пашинов
Научный руководитель: д.т.н., профессор Сафонов А.О.

Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, г. Воронеж

Аннотация. *Закаленная сталь получила широкое применение в автомобильной отрасли для производства таких ответственных узлов и деталей, как трансмиссия, валы, шестерни и подшипники. Поверхностные покрытия режущих инструментов, испытывающие высокие нагрузки, применяются для механической обработки этих узлов и деталей. Покрытия методами физического и химического осаждения паровой фазы показывают наилучшие результаты в процессе штамповки в достаточно тяжелых условиях. Алмазоподобные поверхностные пленки высокой твердости могут успешно применяются для покрытия деталей или отдельных элементов двигателей и трансмиссии.*

Ключевые слова: *автомобиль, адгезия, износ, инструмент, пленка, поверхность, покрытие*

Поверхностный износ определяет продолжительность исправной работы инструмента, который испытывает повышенные нагрузки по причине высоких скоростей и возникновения трения, сопровождающегося повышением температуры. Эти обстоятельства приводят к износу рабочих поверхностей инструментов. Износ поверхностей можно уменьшить с помощью смазки. Различные смазочные материалы плохо работают в экстремальных условиях.

Решение проблемы видится в покрытии поверхностей, способных снизить износ инструмента, повысить срок его эксплуатации и соответственно увеличить рабочий ресурс. Износ автомобильных деталей двигателя и транс-

миссии зависит как от свойств металлов и сплавов, так и от конструкционных показателей поверхности. В деталях поверхность выполняет различные функции в достаточно сложных условиях [1]. Также поверхность автомобильных деталей может подвергаться обработке для повышения характеристик поверхности. Кроме защиты от износа покрытий в автомобилях целесообразно повысить коррозионную стойкость, увеличить твердость поверхности и по возможности снизить материалоемкость.

В настоящее время процессы обработки поверхностей характеризуются постоянным повышением затрат, проблемами повышения производительности и высокими требованиями качества. До развития науки поверхностного покрытия неотъемлемой частью обработки считалось применение смазочно-охлаждающих материалов [2].

Сейчас для производства коленчатого вала, поршня, часто применяется чугун с шаровидным графитом. При его обработке поверхности контакта режущего инструмента должны обладать высокой твердостью и износостойкостью. Достижение поставленной цели можно обеспечить использованием инструментов с покрытием. При проведении исследований было отмечено, что карбидный инструмент с многослойным покрытием $TiC_2N+TiC+TiC_2N+Al_2O_3+TiN$ является предпочтительным для обработки чугуна с шаровидным графитом.

Режущие инструменты на основе алмазных покрытий применяются для обработки алюминиевых и медных сплавов, полимеров и керамики. Они имеют высокую твердость и износостойкость. При этом для широкого использования инструментов с алмазным покрытием требуется исключить недостатки, связанные с низкой адгезией алмазного слоя на подложке, повышенной шероховатостью алмазных пленок и уменьшением прочности на поперечный разрыв.

Четыре типа различных материалов применяется в промышленном производстве для созданий износостойких поверхностей на инструментах. Первый тип содержит покрытия на основе Ti, например, TiN, TiCN. Второй – содержит керамические покрытия, например, Al_2O_3. Третий представляет собой очень твердые покрытия, полученные методами физического или химического осаждения паров материала. Четвертый тип состоит из самосмазывающихся поверхностей с достаточно низким коэффициентом трения, например, аморфный металлический углерод.

Для создания поверхностей можно использовать физическое осаждение паров, при котором материал физически переносится из источника в результате испарения или распыления. Испаряемая фаза переносится энергией пара и конденсируется в виде поверхностной пленки на подложках в условиях вакуума [3].

Процесс осуществляется при температуре около 500° С. При этом легко контролировать толщину пленки на кромках. Химическое осаждение происходит при нагревании на основе реакции химических соединений на

подложках. Имеется возможность формирования толстых слоев. Следует отметить, что около 15 % мощности двигатель внутреннего сгорания, расходуется на преодоление трения между механическими частями.

Физическое осаждение защитной пленки путем магнетронного распыления успешно применяется для покрытия не только поршня, колец, но и других автомобильных деталей. В качестве защитного покрытия применяется алмазоподобный углерод и нитрид хрома.

Таким образом, поверхности деталей с покрытием методами физического и химического осаждения могут увеличить срок службы и повысить качество деталей в автомобильной промышленности. Можно надеяться, что задача производства деталей без смазочных компонентов будет выполнена путем создания поверхностной покрытий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Fundamental of smart coatings and thin films: synthesis, deposition methods, and industrial applications / G. Cui, S. Wang, J. Lin, W. Xing // Prog Org Coat. 2022. № 11. P. 236-247.

2. Сафонов А.О., Бондарев А.Е., Манохин С.В. Пути повышения характеристик композитных покрытий на основе Ti-Al-B-N // Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки: сб. материалов III Всерос. молодеж. конф. Саратов, 22-23 мая 2024 г. / под. общ. ред. д-ра техн. наук, доцента А.А. Фомина. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2024. С. 218-221.

3. Сафонов А.О., Бондарев А.Е. Разработка композитных покрытий на основе соединений хрома с заданными характеристиками // Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки: сб. материалов III Всерос. молодеж. конф. Саратов, 22-23 мая 2024 г. / под. общ. ред. д-ра техн. наук, доцента А.А. Фомина. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2024. С. 223-226.

ВНЕКЛЕТОЧНЫЙ БИОСИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА СМЕШАННЫМ МЕТАНОТРОФНЫМ СООБЩЕСТВОМ

А.А. Сачавский, А.С. Решетова, В.Ю. Виноградова
Научный руководитель: д.т.н., профессор Калёнов С.В.

Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва

Аннотация. *В работе была исследована способность смешанных метанотрофных сообществ синтезировать наночастицы серебра, прове-*

дён анализ их характеристик и антимикробных свойств. Метанотрофное сообщество, содержащее Methylococcus capsulatus, синтезировало наночастицы серебра с выраженными антимикробными свойствами.

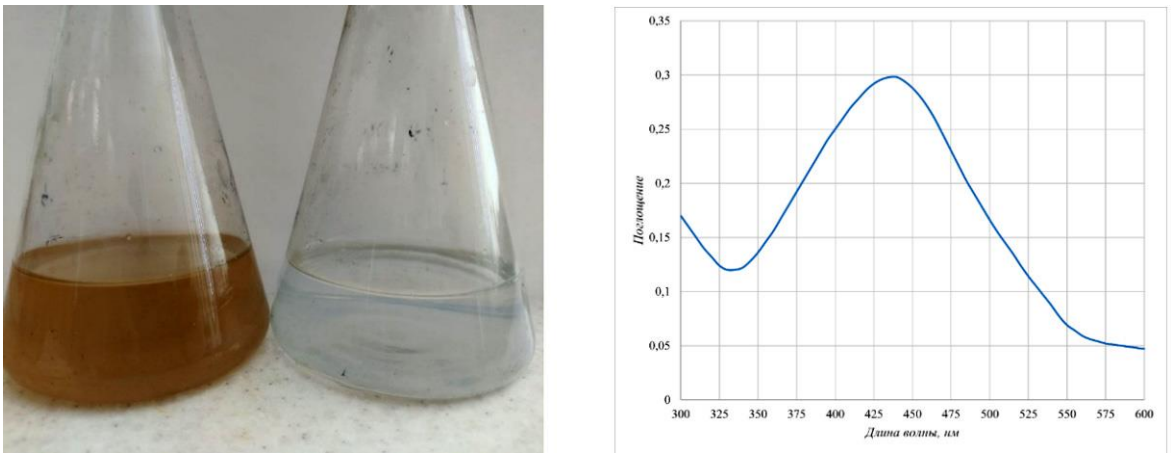
Ключевые слова: *наночастицы серебра; биосинтез наночастиц; метанотрофные сообщества*

Наночастицы серебра (НЧ) выделяются благодаря своим уникальным физическим и биологическим свойствам, что обуславливает их широкое применение в медицине, косметологии, пищевой промышленности и производстве сенсоров [1]. Основным достоинством наносеребра является его пролонгированная антимикробная активность, в отношении широкого спектра микроорганизмов [2]. Метанотрофные бактерии, обладающие способностью усваивать метан, представляют особый интерес для биосинтеза НЧ серебра благодаря уникальному метаболизму, а также способности расти на недорогом и доступном сырье [3]. Исследования показывают, что смешанные метанотрофные культуры могут быть продуктивнее чистых штаммов благодаря синергии с неметанотрофными микроорганизмами [4].

Объектами исследования являлись устойчивые смешанные метанотрофные культуры, полученные в результате условно стерильного культивирования двух метанотрофных штаммов: *Methylococcus capsulatus* (Bath) и *Methylocystis parva*. Оценку возможности синтеза наночастиц серебра смешанными сообществами проводили на минеральной среде NMS с дополнительным внесением 50 мг(Ag^+)/л в форме $AgNO_3$. Периодическое культивирование проводили в течение 48 часов при перемешивании, температуре 37-39 °С и 30 % метана в газовоздушной смеси. В качестве контроля выступала среда NMS без инокулята с аналогичной концентрацией ионов серебра. После культивирования фиксировали изменение цвета суспензии до тёмно-жёлтого или коричневого, что свидетельствует об образовании наночастиц серебра [4]. Суспензию с наночастицами центрифугировали для отделения биомассы. Полученный супернатант исследовали при помощи УФ-спектрометрии в диапазоне длин волн 300-600 нм, метода динамического рассеяния света (ДРС) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) для получения данных о характеристиках внеклеточных наночастиц. Проводили эксперимент по определению минимальной ингибирующей концентрации (МИК) наночастиц серебра с различными концентрациями (25-200 мг/л) по отношению к ряду патогенных микроорганизмов (*Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli* и *Bacillus cereus*) в 96-луночном культуральном планшете в соответствии с принятым протоколом [5].

При культивировании смешанных сообществ на среде, содержащей 50 мг Ag^+/л, было обнаружено изменение цвета суспензии до коричневого при выращивании смешанного сообщества на основе *M. cap-*

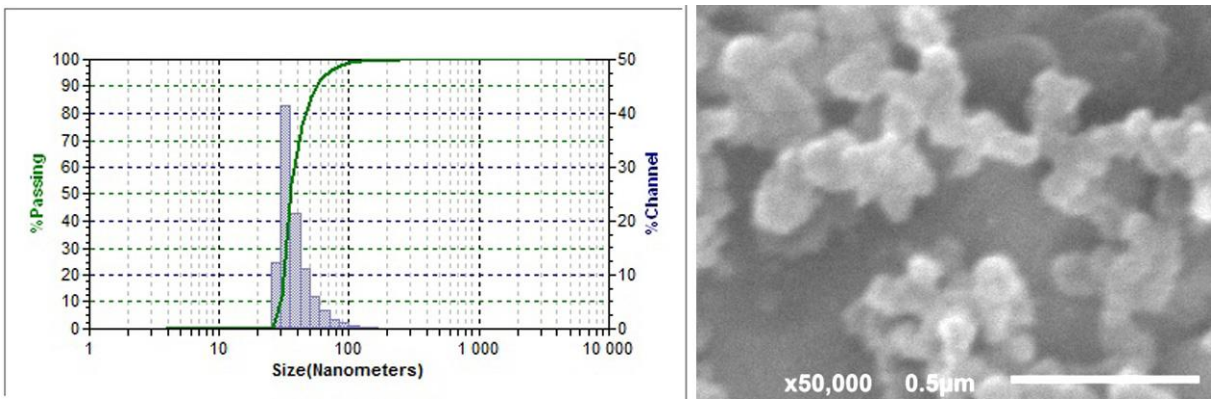
sulatus (рис. 1а), что предварительно указывает синтез серебряных наночастиц. Анализ спектра поглощения супернатанта указывает на наличие выраженного максимума пика в диапазоне 420-440 нм, что связано с явлением поверхностного плазмонного резонанса, обусловленным наличием в системе НЧ серебра (рис. 1, б) [4]. Визуальная и спектроскопическая оценка суспензии сообщества с метанотрофом *M. parva* не обнаружила наличия НЧ серебра.



а б

Рис. 1. а – наночастицы серебра, синтезированные смешанной культурой на основе *M. capsulatus* (слева) и контрольная проба (справа); б – спектр поглощения наночастци серебра, синтезированных смешанной культурой на основе *M. capsulatus*

Результаты проведения методов ДРС и СЭМ демонстрируют, что синтезированные наночастицы серебра покрыты оболочкой и обладают сферической формой и размерами в диапазоне от 25 до 100 нм (рис. 2, а). Основная фракция в суспензии состоит из наночастиц размерами от 25 до 50 нм и следует учитывать, что металлическое ядро этих наночастиц меньше, чем размеры, определяемые ДРС или СЭМ.



а б

Рис. 2. а – распределение наночастиц серебра по размеру;
б – результаты СЭМ наночастиц серебра

Данные о минимальной ингибирующей концентрации демонстрируют различный эффект полученных наночастиц серебра на грамположительные и грамотрицательные патогенные микроорганизмы (таблица). Подавление роста грамотрицательных *E. coli* и *P. aeruginosa* наблюдали при содержании 75 и 50 мг/л соответственно.

Определение МИК («+» – наличие роста; «–» – отсутствие роста)

Тестируемый микроорганизм	Концентрация наночастиц серебра, мг/л					
	200	150	100	75	50	25
E. coli	–	–	–	– (МИК)	+	+
P. aeruginosa	–	–	–	–	– (МИК)	+
B. cereus	–	– (МИК)	+	+	+	+

Культуры *B. cereus* и *S. aureus*, напротив, продемонстрировали более высокую устойчивость к воздействию наносеребра. Тем не менее ингибирование роста данных культур всё же наблюдали при наличии синтезированных НЧ в среде. МИК для *B. cereus* составил 150 мг/л, а для *S. aureus* – 100 мг/л.По итогам исследования было установлено, что некоторые метанотрофные сообщества могут быть использованы для получения наночастиц серебра. Устойчивая бактериальная ассоциация, в которую входит *M. capsulatus*, продемонстрировала способность синтезировать наносеребро. Полученные частицы обладают сферической формой и небольшим диапазоном распределения по размерам, а также проявляют выраженную антимикробную активность по отношению к грамотрицательным патогенным микроорганизмам. И хотя до сих пор не установлено, ответственна ли непосредственно метанокисляющая культура за образование НЧ серебра, либо данную способность проявляет один или несколько неметанотрофных участников консорциума, полученные данные свидетельствуют об электронодонорных характеристиках метанотрофного сообщества в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wasilewska A. et al. Physico-chemical properties and antimicrobial activity of silver nanoparticles fabricated by green synthesis // Food chemistry. – 2023. – Т. 400. – С. 133960.

2. Prabhu S., Poulose E.K. Silver nanoparticles: mechanism of antimicrobial action, synthesis, medical applications, and toxicity effects // International nano letters. – 2012. – Т. 2. – С. 1-10.

3. Gęsicka A., Oleskowicz-Popiel P., Łężyk M. Recent trends in methane to bioproduct conversion by methanotrophs // Biotechnology advances. – 2021. – Т. 53. – С. 107861.

4. Martínez-Castañón G.A. et al. Synthesis and antibacterial activity of silver nanoparticles with different sizes // Journal of nanoparticle research. – 2008. – Т. 10. – С. 1343-1348.

5. Ansari M.A. et al. Evaluation of antibacterial activity of silver nanoparticles against MSSA and MSRA on isolates from skin infections. – 2011.

НОВЫЙ ВОЛНОВОДНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКОСТЕЙ

А.А. Андреев, С.В. Середич, В.И. Гукова, И.В. Хайрушев
Научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент Сергеев С.А., Рябов Е.А.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов

Аннотация. *Разработана волноводная система для измерения диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков в X-диапазоне частот. Определена диэлектрическая проницаемость водных растворов NaCl различной концентрации.*

Ключевые слова: *диэлектрическая проницаемость, X-диапазон, прямоугольный волновод, двойной согласованный волноводный тройник, openEMS*

Диэлектрическая проницаемость является основным параметром материала, которой влияет на поведение электромагнитной волны. Особый интерес представляет исследование диэлектрической проницаемости жидкостей. Это позволит использовать жидкости для создания СВЧ приборов со сложной геометрией. Измерение диэлектрической проницаемости биологических жидкостей позволит проводить медицинскую диагностику, например, уровня сахара в крови [1-4].

Разработанная волноводная система (рис. 1) для определения диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков [5-8] состоит из двойного согласованного волноводного тройника с сечением 23×10 мм^2 и короткозамкнутого трансформатора сопротивления.

Источник электромагнитного излучения расположен в H-плече (порт 1). Через трансформатор сопротивления проходит трубка, заполненная жидким диэлектриком.

Проведено численное моделирование *S*-параметров разработанной волноводной системы с помощью программного пакета openEMS при различных значениях диэлектрической проницаемости исследуемого вещества. Экспериментальные измерения *S*-параметров волноводной системы

с водными растворами NaCl проведены с помощью панорамного измерителя КСВН Р2-61 [9-12]. На рис. 2 показаны результаты численного моделирования.

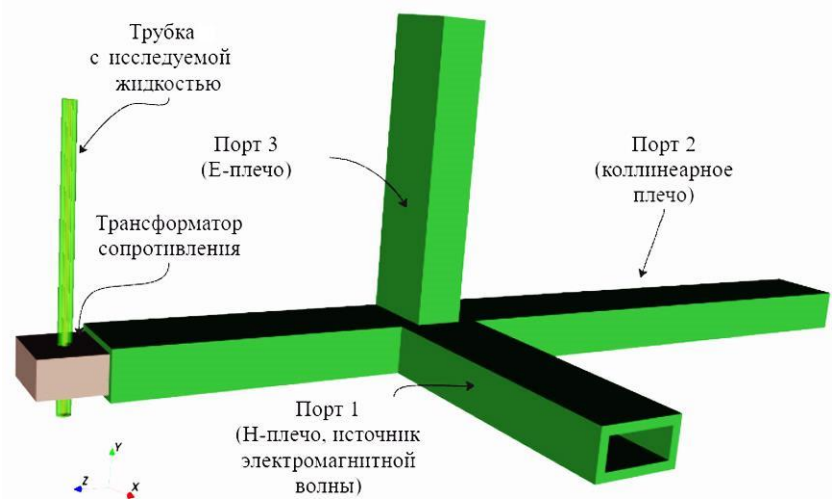


Рис. 1. 3D-модель разработанной волноводной системы
для измерения диэлектрической проницаемости

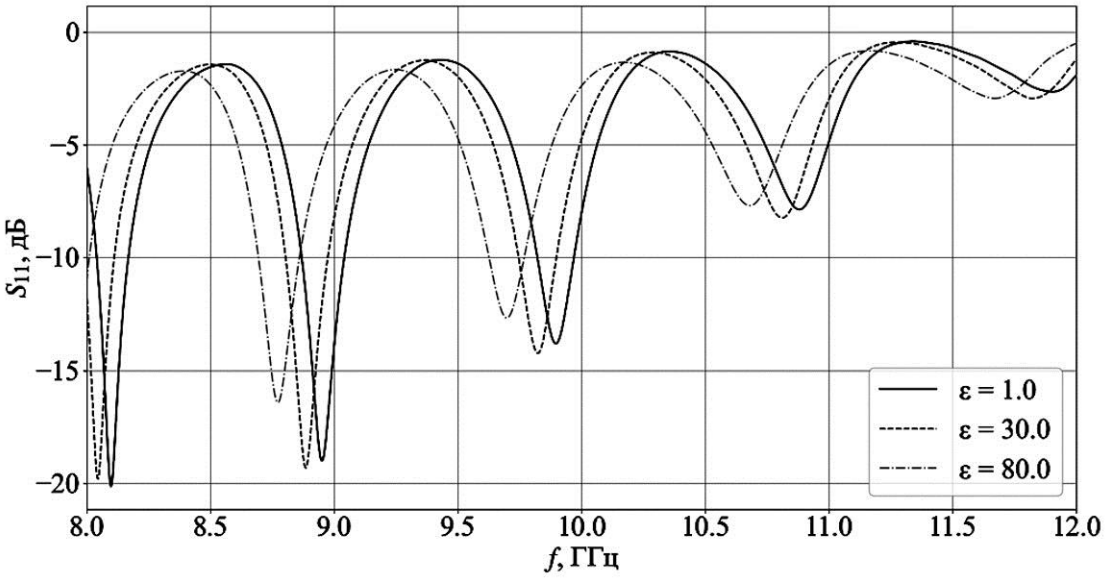


Рис. 2. Результаты численного моделирования S_{11}-параметров
разработанной волноводной системы

По результатам численного моделирования получены зависимости резонансных частот минимумов отражения от диэлектрической проницаемости вещества в трубке. Также частоты минимумов отражения определены по результатам натурного эксперимента. По резонансным частотам получены зависимости диэлектрической проницаемости раствора от концентрации растворенной соли NaCl. Проведено сравнение полученных значений диэлектрической проницаемости с данными из литературы [13, 14]. Результаты представлены на рис. 3.

В результате проведённых исследований разработана волноводная система для измерения диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков. Установлено, что при увеличении диэлектрической проницаемости вещества в трубке резонансные пики отражения смещаются в высокочастотную область. При увеличении концентрации растворенной соли диэлектрическая проницаемость раствора уменьшается. Результаты определения диэлектрической проницаемости данным методом согласуются с литературными данными.

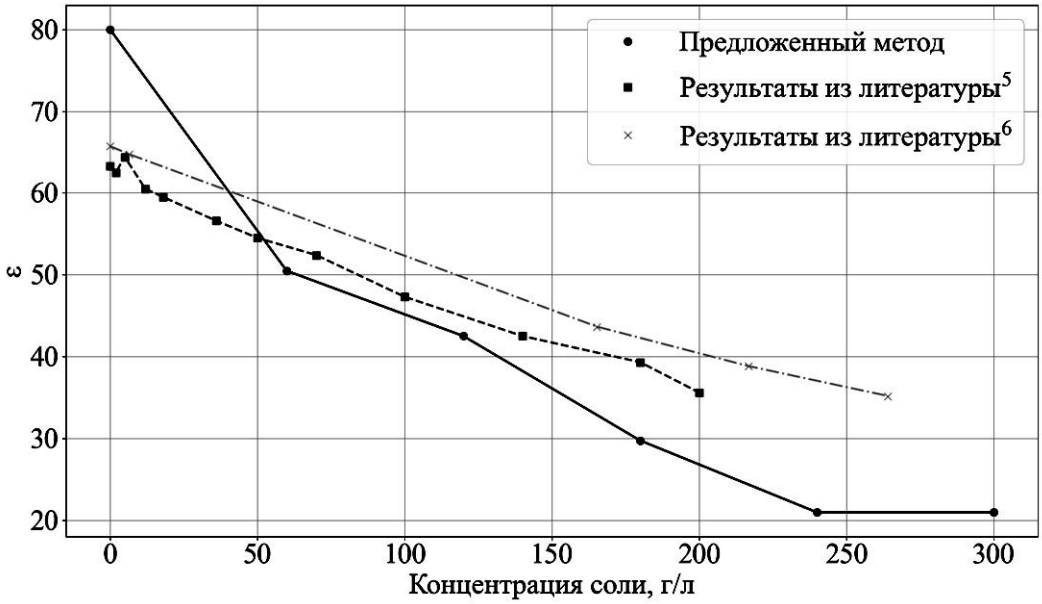


Рис. 3. Результаты численного моделирования S_{11}-параметров разработанной волноводной системы

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Effective permittivity of biological tissue: comparison of theoretical model and experiment / L. Gun et al. // Mathematical Problems in Engineering. 2017. V. 2017. № 1. P. 7249672.

2. Complex permittivity measurements of chicken blood / E. Kratzenberg et al. // Microwave and optical Technol. lett. 2003. V. 39 (1). P. 54-56.

3. Jaspard F., Nadi M. Dielectric properties of blood: an investigation of temperature dependence // Physiolog. measur. 2002. V. 23 (3). P. 547.

4. Abdalla S. Complex permittivity of blood cells and E. coli suspensions // Journal of Molecular Liquids. 2011. V. 160. № 3. P. 130-135.

5. Влияние микроволнового излучения на полимерные микрокапсулы с неорганическими наночастицами / Д.А. Горин и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 2. С. 45-50.

6. Исследование свойств водотопливных эмульсий с наночастицами магнетита на сверхвысоких частотах / С.А. Сергеев и др. // В мире научных открытий. 2014. № 4 (52). С. 148-160.

7. Investigation of absorption and reflection spectra of aqueous suspensions of nanoparticles in the X band of microwave bandwidth / S.A. Sergeev et al. // Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering Saratov Fall Meeting 2006. Saratov, 2007. P. 653606.

8. Коллоиды магнетита: получение и исследование свойств в СВЧ диапазоне / С.А. Сергеев и др. // Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии: сб. статей. Саратов: Наука, 2013. С. 214-228.

9. Автоматизированная установка для измерения спектров КСВН и пропускания жидких диэлектриков / С.А. Сергеев и др. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2019. Т. 1. С. 439-444.

10. Автоматизированная установка для измерения спектров КСВН и пропускания коллоидов микро- и наночастиц / Е.А. Рябов и др. // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: сборник статей. Саратов: Саратовский источник, 2019. С. 188-191.

11. Установка для измерения спектров КСВН и пропускания жидких диэлектриков / Е.А. Рябов и др. // Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: тез. докл. Саратов: Техно-Декор, 2019. С. 214-216.

12. Модифицированная установка для измерения спектров КСВН и пропускания жидких диэлектриков / Е.А. Рябов и др. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2021. Т. 1. С. 586-589.

13. Ашеко А.А., Батулин С.А. Диэлектрические свойства водных электролитных систем. IV. Частота 75, 5 ГГц. // Вестник Харьковского Университета. Серия физическая «Ядра, частицы, поля». 2011. С. 84-88.

14. Buchner R., Hefter G.T., May P.M. Dielectric relaxation of aqueous NaCl solutions // J. of Phys. Chem. A. 1999. V. 103 (1). C. 1-9.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЧХ УПРАВЛЯЕМОГО ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩЕГО ФИЛЬТРА НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ С ПОДВИЖНОЙ ПЛАСТИНОЙ В X-ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

С.В. Середич, А.А. Андреев, В.И. Гукова, И.С. Великанов
Научные руководители: д.ф.-м.н., профессор Михайлов А.И., Рябов Е.А. к.ф.-м.н., доцент Сергеев С.А.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов

Аннотация. *Исследовано влияние металлической пластины на частотные зависимости коэффициентов пропускания полосно-пропускающего*

фильтра в X-диапазоне частот. Рассмотрена периодическая структура с дефектом, внутри которого размещена металлическая пластина. Численное моделирование выполнялось с использованием программного пакета openEMS. Показано, что изменение положения пластины позволяет управлять резонансными свойствами фильтра.

Ключевые слова: *резонансный фильтр, СВЧ диапазон, периодическая структура, openEMS*

Одним из приоритетных направлений развития современной радиотехники является создание перестраиваемых фильтров сверхвысоких частот (СВЧ), которые обеспечивают динамическое управление спектральными параметрами устройств. Данные фильтры находят широкое применение в радиолокационных системах, спутниковой связи, навигации и других областях, требующих высокой точности обработки сигналов. Полосно-пропускающие фильтры играют ключевую роль в выделении полезных сигналов из общего спектра. Перспективным решением является использование подвижных элементов, таких как металлические пластины. Это позволяет изменять характеристики фильтра за счёт модификации его геометрической структуры [1-4].

В данной работе представлены результаты численного моделирования АЧХ управляемого полосно-пропускающего фильтра на основе периодической структуры с дефектом. Основное внимание уделено анализу влияния подвижной металлической пластины на спектр пропускания устройства.

Рассматриваемая структура – прямоугольный блок с регулярными отверстиями шириной g = 9 мм и длиной 18 мм, расположенными с шагом r = 22 мм [5]. Материал структуры – термопластичный пластик с диэлектрической проницаемостью ε, не превышающей 3 [6, 7], что соответствует параметрам материалов, используемых в 3D-печати. В центре структуры находится дефект в виде «бабочки» – воздушная полость сложной формы с двумя симметричными выступами. Внутри дефекта расположена металлическая пластина толщиной 1 мм, шириной w = 20 мм и высотой h (0 ÷ 7 мм). Пластина может поворачиваться на угол α (0 ÷ 90°). Исследуемая конструкция представлена на рисунке 1.

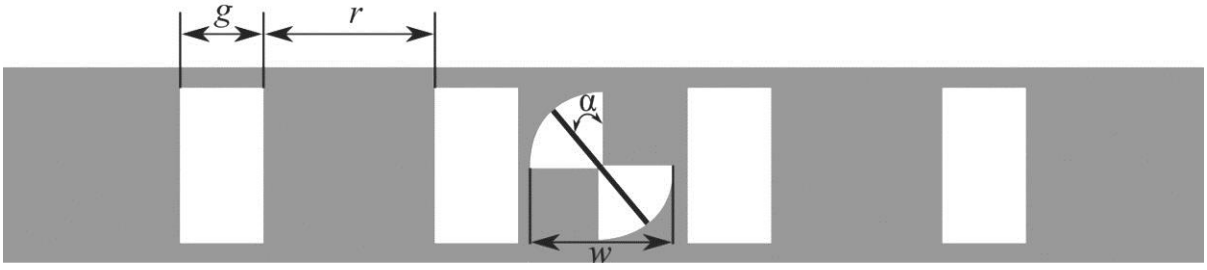


Рис. 1. Конфигурация периодической структуры с дефектом и пластины

Моделирование проводилось в программе openEMS [8] методом конечных разностей во временной области (FDTD). Этот метод обеспечивает высокую точность и учитывает сложные элементы структуры, включая дефект и подвижную пластину. Дефект в форме «бабочка» создает резонансный пик на 7,8 ГГц. Это связано с локализацией поля в дефекте, что подтверждает возможность управления спектральными характеристиками через геометрию структуры.

Анализ спектров пропускания периодической структуры (ε = 2,5) с пластиной (w = 20 мм) при разных значениях высоты h и углах поворота α (0 и 90°), показанных на рис. 2, выявил влияние геометрических параметров пластины на резонансные свойства. При h до 7 мм и α = 0º пик почти не меняется. Однако при α = 90º пик значительно смещается в низкочастотную область. Это связано с изменением распределения электромагнитного поля в области дефекта, вызванным изменением геометрии пластины.

Максимальный сдвиг частоты резонансного пика пропускания достигает 0,45 ГГц при h = 7 мм, что демонстрирует возможность эффективного управления центральной частотой полосы пропускания фильтра за счёт изменения положения и геометрических параметров пластины. Это важно при разработке перестраиваемых фильтров.

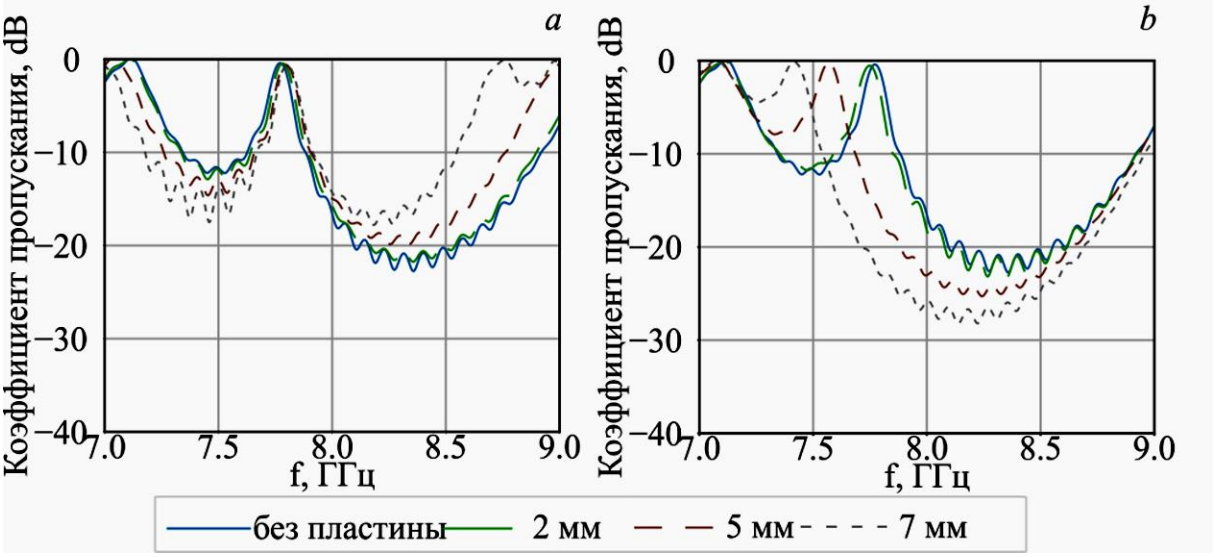


Рис. 2. Спектры коэффициента пропускания периодической структуры с пластиной w = 20 мм и углом поворота α = 0º (a), 90º (b) при различных значениях высоты h

На рис. 3 отображены спектральные характеристики коэффициента пропускания периодической структуры, обладающей диэлектрической проницаемостью в диапазоне от 1,9 до 2,9 с подвижной металлической пластиной w = 20 мм, h = 5 мм и α = 0º. Наблюдается, что увеличение диэлектрической проницаемости приводит к смещению резонансного пика пропускания в область низких частот.

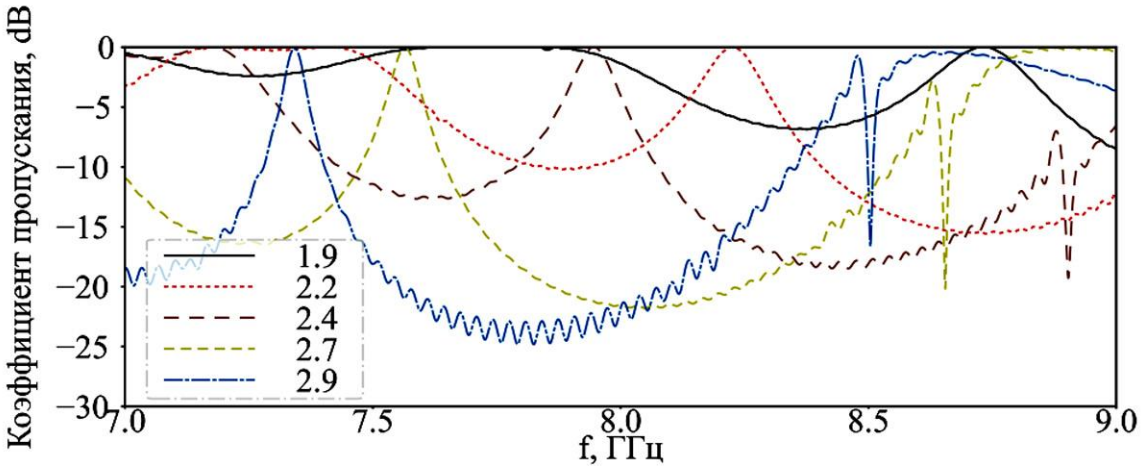


Рис. 3. Спектры коэффициента пропускания периодической структуры с пластиной w = 20 мм, h = 7 мм, α = 0º при различных ε

Результаты исследования показывают, что подвижная пластина в периодической структуре позволяет эффективно контролировать спектр пропускания полосового фильтра. Угол поворота пластины α заметно влияет на резонансные свойства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Комаров В.В., Лукьянов М.А. Волноводные СВЧ-фильтры: технические решения, тенденции развития и методы расчёта // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 1. С. 2.

2. Перестраиваемые СВЧ-фильтры с управляемыми сегнетоэлектрическими конденсаторами / Е.Ю. Замешаева и др. // Письма в Журнал технической физики. 2013. Т. 39. № 18. С. 87-94.

3. Козин А.Э., Фирсенков А.И. Перестраиваемые полосно-пропускающие СВЧ фильтры на магнитостатических волнах для поверхностного монтажа // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2017. Т. 1. С. 506-508.

4. Тюменцев А.И., Хроленко Т.С. Полосовые перестраиваемые фильтры СВЧ // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2017. Т. 1. С. 363-366.

5. Оценка возможностей 3D-печати для изготовления волноводных фотонных кристаллов / А.И. Михайлов и др. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25 (3). С. 29-35.

6. Влияние температуры на диэлектрическую проницаемость пластиков в СВЧ диапазоне / А.А. Андреев и др. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2023. Т. 29. С. 388-392.

7. ользование технологии 3D-печати для создания искусственных электродинамических структур / Е.А. Рябов и др. // Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. 2020. С. 223.

8. OpenEMS–A free and open source equivalent-circuit (EC) FDTD simulation platform supporting cylindrical coordinates suitable for the analysis of traveling wave MRI applications / T. Liebig et al. // Intern. J. of Numer. Modell.: El. Net., Dev. and Field. 2013. V. 26 (6). P. 680-696.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАГРУЗКИ ВЕЩЕСТВ В МИНЕРАЛИЗОВАННЫЙ МИКРОЧАСТИЦАМИ ВАТЕРИТА КОМПОЗИТНЫЙ МАТЕРИАЛ С МАТРИЦЕЙ ИЗ ПОЛИКАПРОЛАКТОНА

И.С. Великанов, Н.В. Короневский, Б.В. Сергеева
Научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент Сергеев С.А.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов

Аннотация. *Проведено исследование процесса загрузки родамина Б в нановолокна поликапролактона, а также в композитный материал на основе волокон поликапролактона, минерализованных ватеритом, содержащим и не содержащим наночастицы магнетита.*

Ключевые слова: *композитный материал, волокна поликапролактона, родамин Б*

Разработка композитных материалов, представляющих комбинацию вещества, выполняющего роль матрицы, и веществ-наполнителей, стала основным направлением в области материаловедения XXI века.

В рамках проведенных исследований был разработан композитный материал [1] на основе нановолокон поликапролактона (ПКЛ) в качестве матрицы и микрочастиц карбоната кальция (ватерита) в качестве наполнителя [2-7]. Последние допировались наночастицами магнетита (Fe_3O_4) [8-12], благодаря чему полученный композитный материал может быть использован для целенаправленной доставки и контролируемого высвобождения лекарственных средств с помощью магнитных полей.

Для анализа процесса загрузки использовался родамин Б (RhB). Были подготовлены три образца структур (каркас на основе волокон ПКЛ, волокна ПКЛ, минерализованные ватеритом, композитный материал на основе нановолокон поликапролактона и микрочастиц карбоната кальция, содержащих наночастицы магнетита) площадью 2,25 $см^2$ и исходный раствор красителя с концентрацией 0,2 мкг/мл. Для инкапсуляции родамин Б методом адсорбции, индуцированной замораживанием [13], пробирки с тестовыми образцами и 2 мл раствора красителя помещались в морозильную камеру при температуре -18 °С на 1 час. После размораживания при ком-

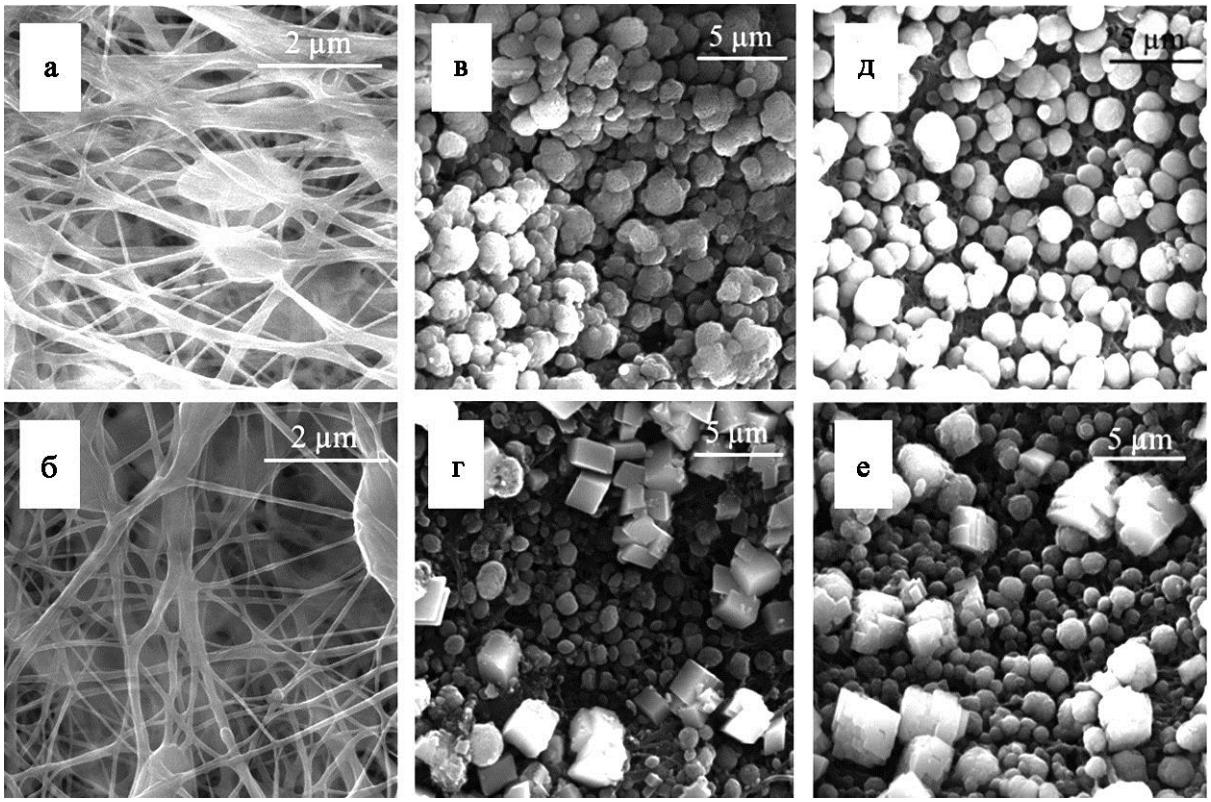
натной температуре от каждого образца отделялся фрагмент площадью 0,25 см^2 для проведения СЭМ-исследований.

Результат исследования процесса загрузки RhB представлен в таблице. Количество загруженного модельного вещества определялось с помощью спектрофотометра ClarioStar, BMG Labtech (Германия) по характерному для родамина Б пику поглощения при длине волны 542 нм.

Показано (таблица), что загрузка красителя происходит и в полимерные волокна, и в покрытие из микрочастиц ватерита. Включение наночастиц магнетита в композитный материал не сказывается на массе загружаемого вещества.

Масса родамина Б, загруженного в тестовые структуры

Время эксперимента, ч	Структура ПКЛ	Структура ПКЛ/$CaCO_3$	Структура ПКЛ/$CaCO_3$/Fe_3O_4
Исходный раствор, мкг/мл	200		
Супернатант, мкг/мл	182 ± 1,81	176,5 ± 1,76	174,2 ± 0,47
Нулевая проба, мкг/мл	3,5 ± 0,04	3,2 ± 0,01	3,1 ± 0,30
Не загруженный RhB, мкг/мл	185,5 ± 1,85	179,7 ± 1,77	177,3 ± 0,77
Загруженный RhB, мкг	13,5	20,3	22,7



СЭМ изображения: нановолокон поликапролактона: а – до загрузки родамина Б, б – после загрузки родамина Б; композитного немодифицированного магнетитом материала: в – до загрузки родамина Б, г – после загрузки; и модифицированного магнетитом материала: д – до загрузки родамина Б, е – после загрузки

Влияние процесса загрузки родамина Б на морфологию поверхности образцов было исследовано с помощью сканирующей электронной микроскопии. Для каждого образца были получены СЭМ изображения до и после загрузки модельного красителя.

На рисунке показаны СЭМ изображения чистых нановолокон поликапролактона и композитного материала, модифицированного и немодифицированного наночастицами магнетита, до загрузки родамина Б и после загрузки.

Анализ СЭМ изображений позволяет сделать следующий вывод: загрузка модельного красителя не оказывает негативного влияния на морфологию поверхности композитного материала вне зависимости от содержания магнетита.

Таким образом, было установлено, что масса загружаемого в композитный материал вещества превышает массу красителя, загруженного в полимерные волокна, в 1,5 раза. Морфология поверхности материала при введении родамина Б не ухудшается. Наличие наночастиц магнетита в материале не влияет на массу загружаемого вещества.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Короневский Н.В., Сергеев С.А., Сергеева Б.В. Композитный материал. Патент 2820707 РФ; № 2023124062; заявл. 19.09.2023; опубл. 07.06.2024 Бюл. № 16.

2. Исследование процесса перекристаллизации микрочастиц карбоната кальция, выращенных на волокнах поликапролактона, с помощью сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской дифракции / N.V. Koronevskiy, O.A. Inozemtseva, B.V. Sergeeva и др. // Известия Саратовского ун-та. Новая серия. Физика. 2023. Т. 23 (2). С. 179-187.

3. Composite mesoporous vaterite-magnetite coatings on polycaprolactone fibrous matrix / Koronevskiy N.V., Savelyeva M.S., Lomova M.V. et al. // Izvestiya of Saratov University. Physics. 2022. Vol. 22 (1). P. 62-71.

4. Короневский Н.В. Сергеев С.А., Ломова М.В., Савельева М.С. Способ минерализации органических волокон поликапролактона микрочастицами карбоната кальция. Патент № 2761321 РФ, № 2021101913; Заявл. 28.01.2021; Опубл. 07.12.2021, Бюл. № 34.

5. Загрузка и высвобождение родамина Б из композитного материала, на основе нановолокон поликапролактона и микрочастиц карбоната кальция, модифицированного и не модифицированного наночастицами магнетита / Н.В. Короневский, Е.С. Прихожденко, О.А. Иноземцева и др. // Перспективные материалы. 2025. № 5.

6. Volodkin D.V., Von Klitzing R., Möhwald H. Pure Protein Microspheres by Calcium Carbonate Templating // Angew. Chem. 2010. Vol. 49. P. 9258-9261.

7. Fakhrullin R.F. et al. Magnetically responsive calcium carbonate microcrystals // ACS Appl. Mater. & Inter. 2009. Vol. 1 (9). P. 1847-1851.

8. Сергеева А.С., Сергеев Р.С., Сергеев С.А. Исследование процесса перекристаллизации магнитных микрочастиц // Фундаментальные и прикладные аспекты новых высокоэффективных материалов. Казань: ИП Синяев Д.Н., 2013. С. 142-144.

9. Сергеев Р.С., Сергеева А.С., Ленгерт Е.В. Формирование и исследование сферических пористых микрочастиц карбоната кальция, обладающих магнитными свойствами // Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы. Москва: Прондо. 2014. С. 275-283.

10. Fajaroh F., Setyawan H., Widiyastuti W., Winardi S. Synthesis of Magnetite Nanoparticles by Surfactant-Free Electrochemical Method in an Aqueous System // Adv. Adv. Powder Technol. 2012. Vol. 23. P. 328-333.

11. Сергеев С.А., Михайлов А.И. и др. Коллоиды магнетита: получение и исследование свойств в СВЧ диапазоне // Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии. Саратов: Наука, 2013. С. 214-228.

12. Короневский Н.В., Хайрушев И.В., Сергеева Б.В. и др. Влияние концентрации наночастиц магнетита в коллоидном растворе на процесс их инкапсуляции в минерализованные волокна поликапролактона // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2023. Т. 1. С. 642-646.

13. Saveleva M.S. et al. Hybrid PCL/$CaCO_3$ scaffolds with capabilities of carrying biologically active molecules: Synthesis, loading and in vivo applications // Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 85. P. 57-67.

БИОСОВМЕСТИМЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ: ПЕРСПЕКТИВЫ В БИОМЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКЕ

Е.В. Сеченева, Н.Р. Моргунов
Научный руководитель: к.т.н. Коробов А.А.

Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов

Аннотация. *Статья рассматривает применение биосовместимых и функционально-градиентных материалов в биомедицинской технике. Приведены их свойства, область применения (имплантаты, стенты, сенсоры) и преимущества – улучшенная интеграция с тканями, снижение воспалений и индивидуализация терапии. Описаны современные технологии получения функционально-градиентных материалов, включая 3D-печать и золь-гель методы. Подчёркивается значение этих материалов для создания надёжных и адаптивных медицинских устройств.*

Ключевые слова: *биомедицинская техника, биосовместимость, функционально-градиентные материалы, имплантаты, биоматериалы, 3D-печать, остеоинтеграция, золь-гель технология, биокерамика, адаптивные медицинские устройства*

Развитие медицинской техники невозможно без создания новых материалов, способных не только безопасно взаимодействовать с живыми тканями, но и адаптироваться к сложным биомеханическим и биохимическим условиям человеческого организма.

Одним из приоритетных направлений исследований и разработок в этой области являются биосовместимые материалы и функционально-градиентные материалы (ФГМ). Их применение значительно расширяет возможности диагностики, терапии, а также процесс реабилитации пациентов с различными заболеваниями.

Биосовместимость – это способность материала выполнять заданную функцию без негативного воздействия на организм и с возможной активацией положительных биологических реакций. Такие материалы используются в производстве:

- ортопедических и стоматологических имплантатов;
- сосудистых стентов;
- кардиостимуляторов;
- биосенсоров;
- хирургических инструментов.

К числу наиболее распространённых биосовместимых материалов относятся:

металлы и сплавы: титан, тантал, сплавы на основе кобальта и хрома, нержавеющая сталь (особенно марки 316L);

полимеры: полиуретаны, полиэтилен высокой плотности (PE-HD), полилактид (PLA), полигликолид (PGA);

керамика: оксид алюминия, циркония, гидроксиапатит – вещества, близкие по составу к костной ткани;

Выбор материала зависит от конкретной задачи: для кардиостимуляторов важна электропроводность и инертность, для суставных протезов – высокая износостойкость и остеоинтеграция.

Функционально-градиентные материалы (ФГМ) – это материалы, свойства которых (например, состав, плотность, модуль упругости) изменяются по объему или направлению. Это позволяет им сочетать свойства различных материалов и снижать риски разрушения на границах контакта с тканями или другими материалами.

Применение в медицинской технике:

– имплантаты костей и суставов: использование ФГМ позволяет создать пористую внешнюю структуру, способствующую прорастанию клеток, и плотное ядро для обеспечения прочности.

– зубные имплантаты: градиент от металла к биокерамике снижает риск отторжения и повышает стабильность.

– покрытия на имплантаты: применение биологически активных градиентов способствует лучшей интеграции с костной тканью.

– менсоры и устройства мониторинга: градиент в чувствительности позволяет точнее отслеживать изменения в физиологических параметрах.

Создание функционально-градиентных структур требует точного контроля состава и структуры материала. Современные технологии включают:

– Аддитивные технологии (3D-печать) – позволяют изготавливать объекты с заданными свойствами послойно;

– плазменное и лазерное напыление – формируют покрытия с градиентом по толщине;

– методы порошковой металлургии – обеспечивают точный контроль над составом и пористостью;

– золь-гель технологии – применяются для получения биокерамических градиентов.

Использование ФГМ и биосовместимых материалов позволяет достичь более прочной и долговечной интеграции имплантатов с тканями, снижения воспалительных реакций и ускорения заживления, повышения комфорта и безопасности пациента, а также индивидуализации медицинских решений за счёт точной настройки свойств материала.

Разработка и применение биосовместимых и функционально-градиентных материалов являются важнейшими направлениями в современной медицинской технике. Эти материалы открывают новые возможности для создания умных, адаптивных и надёжных медицинских устройств, которые способны не только заменять утраченные функции организма, но и активно взаимодействовать с биологической средой, способствуя восстановлению здоровья. Перспективным направлением является применение методов математического моделирования и нейронных сетей для создания и тестирования новых материалов [1-3].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Применение метода градиентного нейросетевого управления в биотехнических системах / С.В. Фролов, А.А. Коробов, К.С. Савинова, А.Ю. Потлов // Информационные технологии и технические средства управления (ICCT-2023): материалы VII Международной научной конференции, Москва, 02-06 октября 2023 года. Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2023. С. 193-195. DOI 10.25728/icct.2024.057.

2. Двухэтапная процедура синтеза управления нелинейными нестационарными объектами с использованием многослойного персептрона /

С.В. Фролов, С.В. Синдеев, А.А. Коробов [и др.] // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8. № 3 (30). DOI 10.26102/2310-6018/2020.30.3.028.

3. Градиентный метод нейросетевого управления многосвязными нелинейными нестационарными стохастическими системами / С.В. Фролов, А.А. Коробов, А.Ю. Потлов, К.С. Савинова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 5. С. 41-48. DOI: 10.25791/pribor.5.2021.1262.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРНУЮ ОРГАНИЗАЦИЮ ДНК

Д.В. Улыбина, Л.Ю. Кривоногов
Научный руководитель: д.т.н., профессор Кривоногов Л.Ю.

Пензенский государственный университет, г. Пенза

Аннотация. *В статье предложена MATLAB-модель с настраиваемыми параметрами, имитирующая воздействие ионизирующего излучения на ДНК и позволяющая визуализировать структурные изменения и оценивать последствия облучения для различных уровней организации ДНК. Модель предназначена для планирования и оптимизации лучевой терапии, радиационной стерилизации, создания новых радиационно-защитных материалов и систем радиационного контроля. Возможна интеграция модели в автоматизированные системы различного назначения.*

Ключевые слова: *моделирование, ионизирующее излучение, радиационные повреждения, разрывы структуры ДНК*

Исследование влияния ионизирующего излучения на структуру ДНК имеет большое значение не только для фундаментальных наук, но и для медицины и прикладных технологических задач.

Повреждения дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), возникающие под влиянием ионизирующего излучения, могут приводить к критическим последствиям, таким как мутации, гибель клеток или их злокачественная трансформация [1].

Традиционные методы исследования этих процессов требуют значительных временных и финансовых затрат, в то время как компьютерное моделирование предлагает быстрый и эффективный альтернативный подход.

ДНК состоит из двух спиральных цепей, образованных нуклеотидами аденин (A), тимин (T), цитозин (C), гуанин (G). Ионизирующее излуче-

ние повреждает ДНК напрямую за счет ионизации или косвенно за счет образования свободных радикалов, вызывая мутации и разрывы цепей.

Разрывы в ДНК могут приводить к серьезным биологическим последствиям. Двойные разрывы ДНК чаще всего связываются с более высоким риском мутаций и канцерогенеза. При отсутствии эффективного восстановления поврежденной ДНК может происходить гибель клеток или их трансформация в опухолевые клетки [2]. Двойные разрывы особенно опасны, так как связаны с высоким риском мутаций и рака. Клеточные механизмы репарации ДНК включают в себя несколько путей, которые исправляют повреждения и восстанавливают целостность генетической информации. Основные пути восстановления включают:

– репарацию путём удаления нуклеотидов (Nucleotide Excision Repair, NER – эксцизионная репарация нуклеотидов) – исправляет искажения двойной спирали (например, после УФ-излучения);

– репарацию путём удаления оснований (Base Excision Repair, BER – эксцизионная репарация оснований) – удаляет поврежденные основания (например, окисленные) [3];

– ремонт двойных разрывов, который в свою очередь включает в себя два основных пути: не гомологичное соединение (NHEJ – Non-Homologous End Joining) и гомологичное восстановление (HR – Homologous Recombination).

NHEJ может быть быстрым и менее точным, тогда как HR обычно более надежен, но требует наличия гомологичной последовательности для восстановления.

Одиночные разрывы чаще восстанавливаются через BER, а двойные – через NHEJ или HR [1].

Для моделирования и анализа воздействия радиации на ДНК была разработана программа на языке MATLAB, включающая несколько ключевых этапов:

1. Генерация первичной структуры ДНК, представленной последовательностью нуклеотидов (A, T, G, C), которые служат основой для построения более сложных структур.

2. Визуализация вторичной структуры – формирование двойной спирали ДНК с учётом водородных связей между комплементарными основаниями (рис. 1).

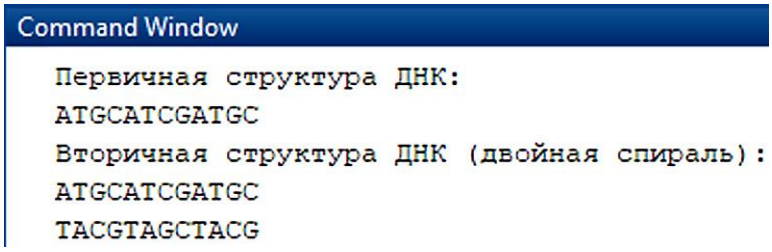


Рис. 1. Моделирование первичной и вторичной структур ДНК

3. Имитация и визуализация повреждений с использованием вероятностного подхода. Вероятность возникновения одиночного разрыва составляет 0,1, двойного – 0,05, что отражает реальные условия радиационного воздействия.

Программа позволяет варьировать параметры излучения, такие как интенсивность и тип частиц, что делает её гибким инструментом для анализа различных сценариев. Результаты работы программы MATLAB наглядно демонстрируют локализацию и тип повреждений.

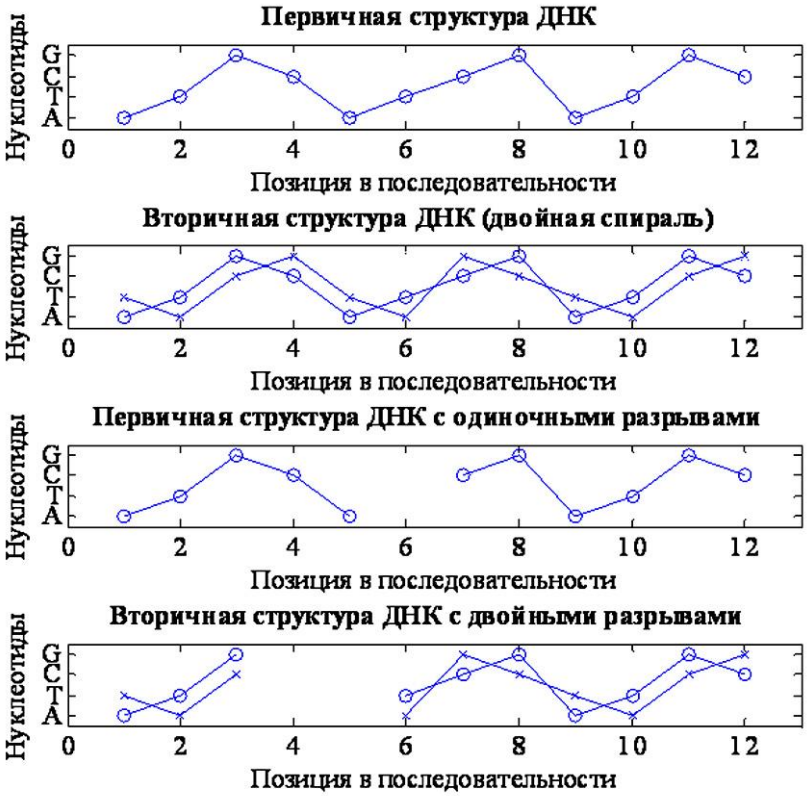


Рис. 2. Визуализация разрывов структуры ДНК

Визуализация комплементарных нитей помогает понять, как одиночные и двойные разрывы могут затруднять нормальное функционирование ДНК и её репарацию. Моделирование показало, что одиночные разрывы нарушают целостность одной из нитей ДНК, оставляя вторую нить неповрежденной (разрывы могут быть восстановлены репаративными механизмами), а двойные разрывы опаснее – разрушают обе нити ДНК, что затрудняет восстановление и повышает риск ошибок при репарации.

Разработанная модель позволяет симулировать воздействие радиации на биологические структуры, помогая точнее подбирать дозы облучения в радиотерапии и стерилизации. Кроме того модель может быть использована при создании радиационно-защитных материалов и систем мониторинга для атомных электростанций и космических миссий, а также в геномном редактировании для индукции мутаций.

Таким образом, модель имеет широкие перспективы применения в медицине и космических технологиях. Её дальнейшее развитие и интеграция в современные автоматизированные системы сделают её важным инструментом в радиационной биологии и смежных областях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Van Gent D.C., Hoeijmakers J.H., Kanaar R. Chromosomal stability and the DNA double-stranded break connection. Nat Rev Genet. 2001; 2(3): 196-206. doi: 10.1038/35056049.

2. Ward J.F. The complexity of DNA damage: relevance to biological consequences. International Journal of Radiation Biology. 1994; 66(5):427-432. doi: 10.1080/09553009414551401.

3. Sage E., Shikazono N. Radiation-induced clustered DNA lesions: Repair and mutagenesis. Free Radic Biol Med. 2017; 107:125-135. doi: 10.1016/ j.freeradbiomed.2016.12.008.

ОСНАСТКА ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ В РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСАХ

В.А. Филин
Научный руководитель: Гнидина И.В.

Тульский государственный университет, г. Тула

Аннотация. *В работе разработана и изготовлена оснастка (кассета) для модернизированного роботизированного комплекса. Предложенная конструкция кассеты позволяет достичь оптимизации внутреннего пространства за счет размещения элементов питания внутри несущей рамы; модульность разработанной конструкции позволяет наращивать емкость элементов питания в зависимости от требуемых тактико-технических характеристик комплекса.*

Ключевые слова: *роботизированные комплекс, АКБ, АБС-пластик, FDM-печать*

Введение. Роботизированный комплекс (РК) – это система, объединяющая в себе промышленный робот и оборудование, предназначенное для выполнения различных технологических операций (доставки грузов, разминирования полей, замены носилок на боле боя, использование в качестве базы для размещения вооружения). РК, как правило, представляют собой закрытый сварной корпус, в котором размещается двигатель, аккумуляторная батарея (АКБ) и система управления. Корпус оснащается

съёмным куполом (крышкой). В рамках модернизации существующих РК были внесены изменения в конструкцию несущей рамы, а также произведена замена металлических материалов на композиционные. На рисунке 1 представлена исходная конструкция РК и рама, выполненная из композиционного материала.

а б

Рис. 1. Роботизированный комплекс (а) и рама модернизированного РК (б)

Несущая рама модернизированного РК выполнена из полых труб квадратного сечения, изготовленных из композиционного материала на основе углеволокна. Профиль сечения рамы имеет габаритные размеры 800 × 32 × 32 мм и внутренний размер 25,5 × 25,5 мм. Поскольку в модернизированном РК по сравнению с исходной конструкцией внутреннее пространство представляет собой каркас, а не полностью закрытый короб, возникает проблема размещения двигателей, АКБ и системы управления.

Целью работы является разработка оснастки для размещения АКБ в модернизированном РК.

Результаты и обсуждения. На основе анализа существующих технических решений [1] было предложено разместить элементы АКБ внутри полых труб рамы, что позволило бы использовать все их внутреннее пространство. Двигатель РК имеет мощность 750 Вт и рабочее напряжение 60 В, поэтому для достижения нужного напряжения потребуется последовательно соединить 16 литий-ионных элементов типа 18650 диаметром 18 мм и длиной 65 мм каждый.

Для надежной фиксации и изоляции отдельных батарей необходимо разработать и изготовить специальную оснастку в виде кассеты для размещения внутри трубы без зазоров. Для удобства последующей сборки и размещения было принято решение об изготовлении двух кассет на 8 элементов каждая с последующим их соединением.

На рис. 2 представлена конструкция кассеты на 8 элементов размерами 650 × 25,5 × 25,5 мм. Конструкция предполагает возможность дальнейшего наращивания количества элементов в зависимости от требуемого рабочего напряжения.

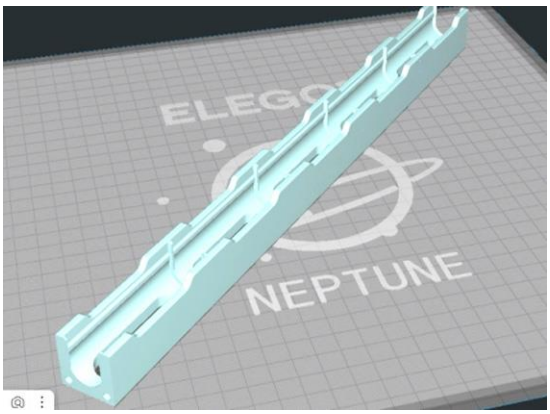


Рис. 2. Кассета для размещения аккумуляторных батарей внутри рамы

На основе анализа существующих технологий изготовления изделий из неметаллических материалов [3] в качестве метода изготовления был выбран метод FDM-печати. Поскольку к физико-механических свойствам кассеты не предъявляется повышенных требований, для изготовления использовался АБС-пластик, как наиболее распространенный материал для FDM-печати. Паспортные характеристики материала приведены в таблице 1. Печать кассет осуществлялась на принтере Anycubic. Параметры печати выбраны, исходя из результатов предварительных испытаний (табл. 2).

Таблица 1

Основные показатели АБС-пластика марки REC

Показатель	Значение
Плотность, г/см^3	1,05
Прочность на растяжение, МПа	29,6
Модуль упругости на изгиб, ГПа	2,14
Прочность на сжатие, МПа	49,3
Модуль упругости на сжатие, ГПа	1,71

Таблица 2

Параметры печати

Параметр	Значение
Высота слоя	0,2
Плотность заполнения	45 %
Температура печати	240
Температура стола	70

После печати была произведена сборка АКБ, для чего в каждую кассету устанавливались последовательно 8 аккумуляторных элементов анодом к катоду, соединённых контактной сваркой с последующим покрытием мест соединений термоусаживаемым изоляционным материалом. Готовые кассеты устанавливались в несущую раму, на выходе провода всех элементов были выведены на один коннектор, соединенный с разъёмом системы управления РК (рис. 3).

После установки АКБ был проведен пробный запуск комплекса. Двигатель и система управления РК отработали в штатном режиме. Размещение АКБ в раме, позволило интегрировать в РК дополнительные элементы питания, за счет чего был увеличен запас хода и время автономной работы РК.

а б

Рис. 3. Процесс сборки АКБ: а – аккумуляторные элементы в кассете;
б – кассеты в несущей раме

Выводы. Разработанная оснастка (кассета) позволила достичь оптимизации внутреннего пространства модернизированного РК за счет размещения элементов питания внутри несущей рамы.

Модульность разработанной конструкции позволяет наращивать емкость АКБ в зависимости от требуемых тактико-технических характеристик комплекса.

Работа выполнена в рамках работы студенческого конструкторского бюро «Полимерные композиционные материалы и технологическое оборудование», договор № 9 от 30.11.24.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Особенности конструктивных решений размещения и обслуживания накопителей энергии унифицированной машины технологического электротранспорта / Н.М. Филькин и др. // Транспорт на альтернативном топливе. 2018. № 4 (64). С. 49-55.

2. Бурый Е.Н. Водородный топливный элемент // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов. 2022. С. 228-232.

3. Ахмедеев М.В. Аддитивные технологии. FDM-печать // Наука молодых-будущее России. 2019. С. 229-233.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ КАВИТАЦИОННО-ДИФФУЗИОННОМ МЕТОДЕ СИНТЕЗА НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА

М.В. Филиппов, Н.Д. Шапкин
Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор Джимак С.С.

Кубанский государственный университет, г. Краснодар

Аннотация. *В работе исследовано влияние параметров УФ-излучения (длина волны, интенсивность, время воздействия) на процесс кавитационно-диффузионного синтеза наночастиц серебра. Определены оптимальные условия, обеспечивающие получение стабильных наночастиц с контролируемыми размерами.*

Ключевые слова: *наночастицы серебра, УФ-излучение, математическая модель*

Одним из популярных методов синтеза наночастиц серебра является фотохимическое восстановление, при котором ионы серебра (Ag^+) преобразуются в металлическое серебро (Ag°) под воздействием света, чаще всего ультрафиолетового (УФ). Кавитационные эффекты, возникающие, например, при использовании ультразвука, способны значительно повысить эффективность синтеза наночастиц, улучшить их морфологию и сократить время реакции [1]. Рассмотрим, как кавитация влияет на фотохимическое восстановление наночастиц серебра, какие механизмы лежат в основе этого взаимодействия и какие перспективы открывает такой подход.

Фотохимический синтез наночастиц серебра основан на использовании света для инициирования восстановления ионов Ag^+ до Ag°. Обычно в качестве источника света применяют УФ-лампы, а в реакционной смеси присутствуют фотосенсибилизаторы или восстановители. Под воздействием света фотосенсибилизатор поглощает фотоны, переходит в возбужденное состояние и передает электроны ионам серебра, запуская процесс их восстановления.

Образующиеся атомы серебра затем агрегируют в наночастицы, размер и форма которых зависят от условий реакции (pH, концентрация реагентов, интенсивность света).

Для оптимизации экспериментов и математического описания физико-химического процесса синтеза наночастиц серебра была разработана математическая модель метода кавитационно-диффузионного фотохимического восстановления [2]. Ранее при проведении синтеза было установлено, что колебания температуры происходят в пределах долей градусов, что позволяет считать её постоянной [3]. Наличие ультразвукового воздей-

ствия на систему позволяет считать, что все параметры усреднены по пространству.

Процесс кавитационно-диффузионного фотохимического восстановления наночастиц был описан в работе [4].

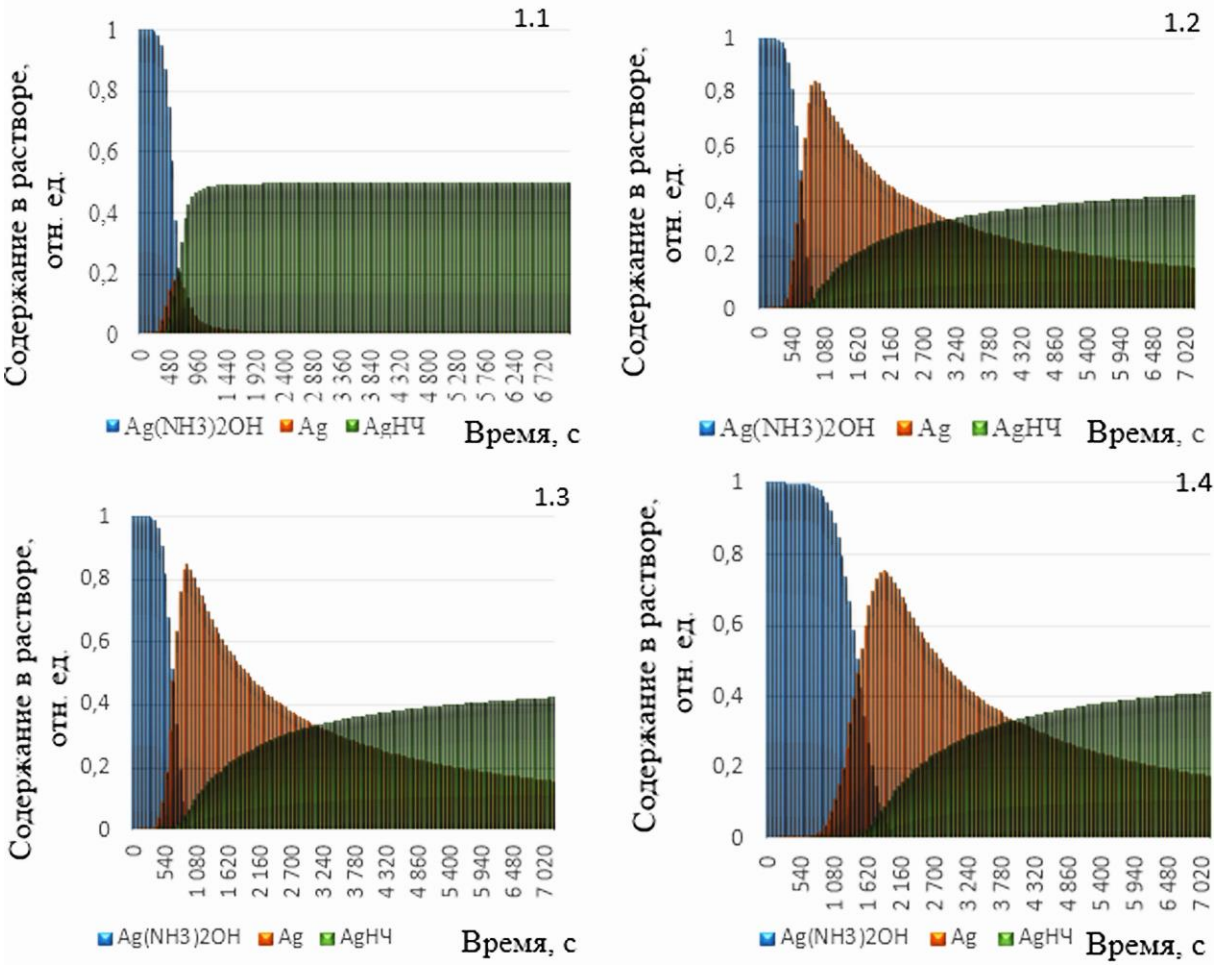


Рис. 1. Зависимость концентрации от времени
при изменении интенсивности потока УФ излучения

Примечание: 1.1 – при 1 интенсивности потока УФ; 1.2 – при 0,75 интенсивности потока УФ; 1.3 – при 0,5 интенсивности потока УФ; 1.4 – при 0,25 интенсивности потока УФ;

Анализ кинетических кривых при стандартных условиях (рис. 1.1) выявил четкую последовательность преобразований:

1. Аммиачный комплекс полностью исчезает за 15 мин, переходя в атомарную форму.

2. Концентрация атомарного Ag резко растет первые 12 мин, затем снижается из-за образования наночастиц.

3. Димеры практически не образуются первые 12 мин, активно формируются после насыщения атомарным Ag, процесс останавливается к 51 минуте.

На рис. 2 представлены микрофотографии проб раствора с наночастицами серебра, в зависимости от длительности процесса синтеза.

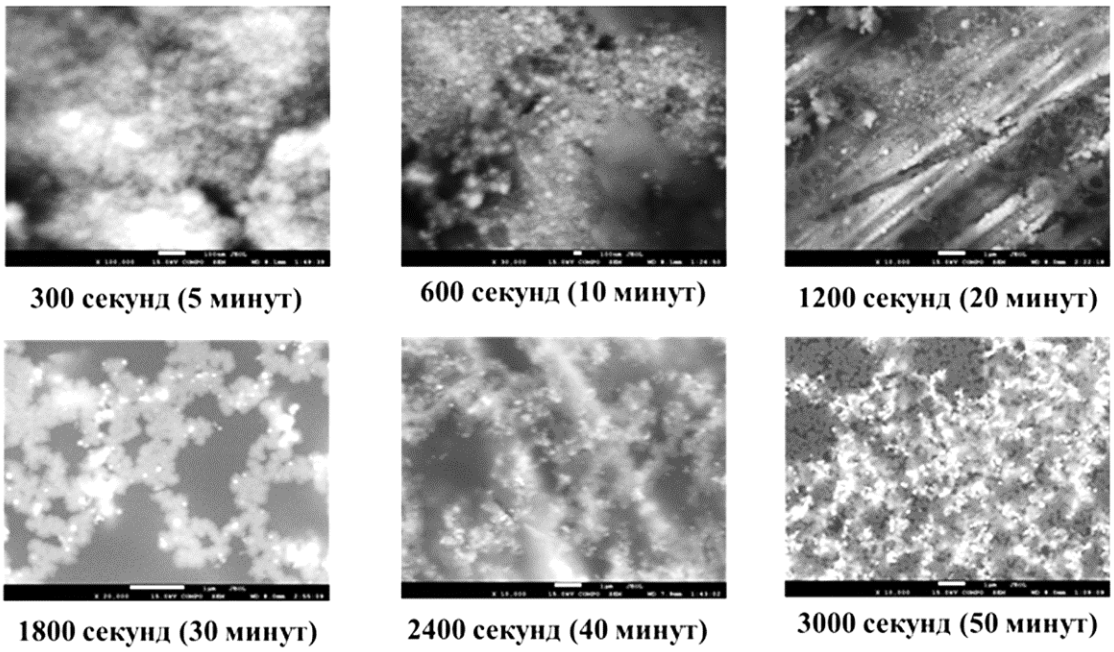


Рис. 2. Микрофотографии проб раствора с наночастицами серебра, в зависимости от длительности процесса синтеза

Для подтверждения модельных расчетов был произведен отбор проб в процессе синтеза. Как видно из рисунка 2, через 5 минут после начала синтеза наночастицы отсутствуют. Через 10 минут от начала синтеза появляются первые наночастицы малого размерного диапазона (1-5 нм). В течение следующих 20 минут происходит плавное увеличение их количества и размера (появляются частицы в диапазоне 5-10 и 10-15 нм). После 50 минут формируются крупные наночастицы серебра, сопровождаемые образованием агломератов размером до 40 нм. Данный процесс соответствует модельным расчетам (рис. 1.1).

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации Кубанскому государственному университету (FZEN-2023-0006).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Influence of gelling agents on morphological properties of silver nanoparticles in the developed composition / Kopytov G.F., Shashkov D.I., Basov A.A., Malyshko V.V., Moiseev A.V., Shapkin N.D., Esaulenko E.E., Dzhimak S.S. // Russ Phys J (2025). URL: https://doi.org/10.1007/s11182-025-03404-4.

2. Физико-математическая модель процесса синтеза наночастиц серебра / Шашков Д.И., Малышко В.В., Дроботенко М.И., Джимак С.С. //

Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2023. Т. 20. № 3. С. 86-92.

3. Влияние альгинатно-тканевого покрытия с наночастицами серебра на течение раневого процесса у лабораторных животных / Малышко В.В., Федулова Л.В., Соколов М.Е., Моисеев А.В., Басов А.А., Дорохова А.А., Шашков Д.И., Джимак С.С. // Биофизика. 2023. Т. 68. № 2. С. 376-383.

4. Sorption activity of silver nanoparticles / Dzhimak S.S., Malyshko V.V., Goryachko A.I., Sokolov M.E., Basov A.A., Moiseev A.V., Shashkov D.I., Kopytov G.F., Baryshev M.G., Isaev V.A. // Russian Physics Journal. 2019. Vol. 62. № 2. P. 314-322. DOI 10.1007/s11182-019-01714-y

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ МЕДИ С ВЫСОКОЙ АДГЕЗИЕЙ НА СТАЛЬ: РОЛЬ ЩЕЛОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА

А.Г. Холодкова, М.Н. Абозина
Научный руководитель: д.т.н., профессор Ваграмян Т.А.

Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва

Аннотация. *В работе исследован щелочной бесцианидный электролит на основе оксиэтилендифосфоновой кислоты (ОЭДФ) для электрохимического осаждения меди на сталь. Традиционные цианидные электролиты, несмотря на высокую адгезию покрытий, обладают значительной токсичностью, что обуславливает необходимость поиска экологически безопасных альтернатив. В ходе исследования изучено влияние параметров электролита на качество медного покрытия. Установлено, что ключевую роль в обеспечении адгезии играет адсорбционная пленка, формирующаяся на поверхности стали при определенном значении pH. Наилучшие условия процесса (0,1 М Cu^{2+}, 0,7 М ОЭДФ, pH 9,5, 55 °С) обеспечивают высокую адгезию покрытия. Импедансные измерения также позволяют предположить наличие защитной пленки при pH 9,5 и её отсутствие при pH 7,5, что коррелирует с ухудшением адгезии. Разработанный электролит представляет собой перспективную экологически безопасную альтернативу цианидным системам для промышленного применения.*

Ключевые слова: *электроосаждение меди, оксиэтилендифосфоновая кислота, бесцианидный электролит, адгезия, адсорбционная пленка*

Введение

Электрохимическое осаждение меди на сталь широко применяется в различных отраслях промышленности, включая производство печатных плат, защитно-декоративных покрытий и местной защиты стальных изде-

лий. Традиционно для этого процесса используются цианидные электролиты, которые обеспечивают высокую адгезию покрытий. Однако высокая токсичность цианидов делает их применение экологически небезопасным и требует поиска альтернативных решений [1-2]. В данной работе представлено исследование щелочного бесцианидного электролита на основе оксиэтилендифосфоновой кислоты (ОЭДФ), направленное на создание экологически безопасного и эффективного метода меднения стали.

Методы и материалы

Исследования проводились с использованием электролита, содержащего ионы меди и ОЭДФ. В качестве подложки использовались образцы из углеродистой стали марки 08пс. Электроосаждение проводилось при различных параметрах: плотность тока (0,1-2,5 А/дм^2), температура (20-70 °С), pH (7,5-11). Для оценки адгезии покрытий применялся метод рисок [3]. Толщина адсорбционной пленки, формирующейся на поверхности стали, измерялась методом эллипсометрии. Также проводились исследования импеданса [4] для изучения влияния pH на формирование пленки.

Результаты и обсуждение

Проведенные эксперименты позволили выявить ключевые факторы, влияющие на процесс электрохимического осаждения меди на сталь в щелочном электролите на основе оксиэтилендифосфоновой кислоты. Одним из наиболее значимых результатов стало обнаружение адсорбционной пленки, формирующейся на поверхности стали при погружении в электролит. Эта пленка играет роль защитного барьера, предотвращающего контактное осаждение меди, которое традиционно ухудшает адгезию покрытия.

Экспериментальным путем установлены параметры электролита, обеспечивающие максимальную эффективность процесса: концентрация ионов меди (Cu^{2+}) – 0,1 М, концентрация ОЭДФ – 0,7 М, pH – 9,5, температура – 55 °С, перемешивание. В этих условиях покрытие демонстрирует высокую адгезию (1 балл по методу рисок [3]) независимо от плотности тока (0,1-2,5 А/дм^2) и толщины покрытия (5-15 мкм).

Важным аспектом исследования стало изучение влияния pH на формирование адсорбционной пленки. При pH 9,5 пленка имеет максимальную толщину и обеспечивает наилучшую защиту от контактного осаждения. Однако при снижении pH до 7,5 пленка не формируется, что приводит к ухудшению адгезии покрытия (4 балла по методу рисок). Результаты импедансных измерений подтверждают данную теорию: при pH 9,5 на диаграмме Найквиста наблюдается полукруглая форма, указывающая на наличие адсорбционной пленки, в то время как при pH 7,5 диаграмма демонстрирует отсутствие характерных признаков её формирования.

Также было установлено, что толщина адсорбционной пленки увеличивается с ростом температуры и концентрации ионов меди и ОЭДФ. Это указывает на то, что оба компонента электролита активно участвуют

в формировании пленки. При этом повышение температуры до 70 °С не оказывает негативного влияния на адгезию, что расширяет диапазон рабочих условий для промышленного применения.

В результате исследования была установлена независимость адгезии покрытия от плотности тока в диапазоне 0,1-2,5 А/дм^2. Данное свойство позволяет варьировать параметры тока без снижения качества покрытия, что существенно упрощает оптимизацию технологического процесса и расширяет возможности его промышленного применения.

Заключение

Разработанный щелочной электролит на основе ОЭДФ обеспечивает высокую адгезию медного покрытия к стали и является более безопасной альтернативой цианидным растворам. Результаты исследования позволяют предположить, что ключевым аспектом, определяющим адгезию, является образование адсорбционной пленки на поверхности стали, предотвращающей контактное осаждение меди. Полученные результаты открывают перспективы для промышленного применения данного электролита в различных отраслях, где требуется высококачественное меднение стальных изделий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Прикладная электрохимия / Р.И. Агладзе, Т.А. Ваграмян, Н.Т. Гофман, Н.Т. Кудрявцев. 3-е изд. Москва: Химия, 1984.

2. Гальванотехника: справ. изд. / Ажогин Ф.Ф., Беленький М.А., Галль И.Е., Гинберг А.М. и др. Москва: Металлургия, 1987. 736 с.

3. ГОСТ 9.302-88. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля. Москва: ИПК Изд-во стандартов, 1988. 38 с.

4. Импедансная спектроскопия: теория и применение: учеб. пособие / Емельянова Ю.В., Морозова М.В., Михайловская З.А., Буянова Е.С.; под общ. ред. Е.С. Буяновой; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. 156 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПЭКК, СФОРМИРОВАННЫХ НА TI МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОРАСПЫЛЕНИЯ

Ц. Ли, В.Р. Букал
Научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент Твердохлебов С.И.

Томский политехнический университет, г. Томск

Аннотация. *В работе рассматривается новый метод создания покрытий для медицинских изделий. Целью работы являлась разработка*

биоинертных покрытий, предотвращающих развитие у пациентов аллергических реакций на титановые сплавы.

Ключевые слова: *полиэфиркетонкетон, покрытия, электрораспыление, морфология, поверхностная энергия*

Введение. Полиарилэфиркетоны (ПАЭК) – современные высокопрочные конструкционные материалы. Представитель семейства ПАЭК – полиэфиркетонкетон (ПЭКК) имеет молекулярную структуру с двумя кетоновыми группами, что обеспечивает ему уникальные свойства. ПЭКК обладает отличными механическими свойствами, химической стойкостью, термостойкостью и износостойкостью, что позволяет его применять для производства различных имплантатов [1].

Для изготовления костных имплантатов наиболее широко применяются титановые сплавы, относящиеся к классу биоинертных материалов. Однако в ~ 1 % случаев отмечается аллергические реакции на Ti сплавы, способные вызвать отторжение имплантатов [2]. Для исключения этих негативных реакций организма в обоснованных случаях на титановые имплантаты требуется наносить покрытия с хорошими биоинертными свойствами [2]. ПЭКК является перспективным материалом для формирования таких биоинертных покрытий.

Целью работы являлось разработка метода формирования покрытий из ПЭКК на поверхности Ti и исследование их свойств.

Материалы и методы. В качестве подложек использовались титановые пластины из ВТ1-0 размером 1×3 см, подвергнутые пескоструйной обработке карбидом кремния со средним размером зерен 370 мкм в камере ТСС РК-100 (ТСС ЮФО, Пятигорск, Россия). Для формирования покрытия было предложено использовать метод электрораспыления полимерных растворов, обеспечивающий получение высококачественных покрытий [3]. Для приготовления растворов полимеров использовали ПЭКК (Kepstan®, Arkema, Франция) и гексафторизопропанол ($(CF_3)_2CHOH$, ПиМ-Инвест, Россия). Нанесение покрытий проводили на установке NANON-01A (МЕСС Co, Япония) в следующих режимах: объём раствора 10 мл, напряжение между коллектором и иглой – 20 кВ, скорость расхода раствора – 5 мл/ч. Было изготовлено четыре группы образцов: 1 (Контроль) – Ti, 2 – Ti+0,5 % ПЭКК, 3 – Ti+1 % ПЭКК, 4 – Ti+1,5 % ПЭКК с использованием растворов с содержанием ПЭКК 0,5, 1 и 1,5 вес. % соответственно.

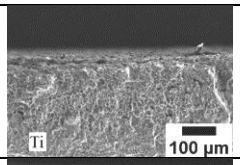
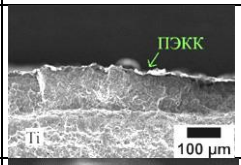
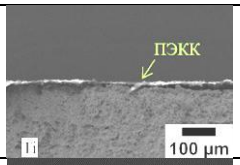
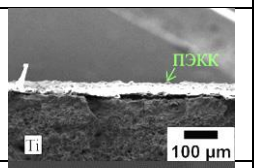
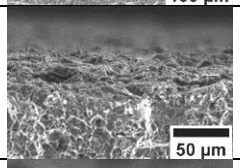
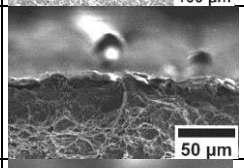
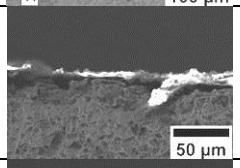
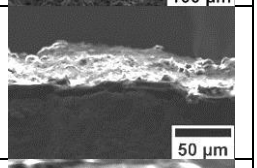
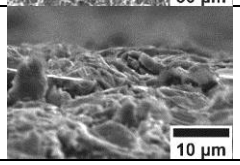
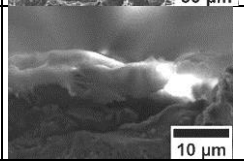
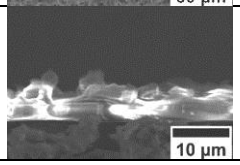
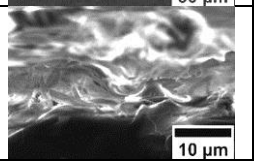
Для исследования поверхности покрытий применяли сканирующий электронный микроскоп Quanta 200 3D (FEI, США). С целью исследования поперечных сечений образцов их подвергали охлаждению в жидком азоте с последующим резким разломом. Поперечные структуры изучались с помощью сканирующего электронного микроскопа EM-30 (COXEM Co., Ltd., Южная Корея). Оценка толщины покрытия

и размеров её структурных элементов проводилась с использованием программы ImageJ. Определение краевого угла смачивания и поверхностной энергии образцов проводили методом сидячей капли на приборе EasyDrop (DSA20E, KRÜSS GmbH, Гамбург, Германия). Использовали три жидкости: деионизированная вода (Solopharm, Санкт-Петербург, Россия), глицерин ($C_3H_8O_3$, 99,3 %, ЭКОС-1, Москва, Россия) и дийодметан (CH_2I_2, 99 %, Acros Organics, Геел, Бельгия).

Экспериментальная часть. Микроструктуры поперечных сечений образцов приведены в таблице 1. На СЭМ-изображениях групп 2, 3, 4 четко виден сформированный слой ПЭКК покрытия.

Таблица 1

СЭМ изображения поперечных сечений образцов

Увеличение	Группа			
	1	2	3	4
×300				
×1000				
×5000				

Морфология поверхности образцов групп 2 и 3 представляет собой сплошное покрытие, повторяющее форму титановых образцов (контроль), подвергнутых пескоструйной обработке. Покрытие группы 4, СЭМ изображение которого приведено на рис. 1, в отличие от групп 2 и 3 представляет собой волокнистую структуры с бусинками. Толщина покрытий и размеры их структурных элементов (диаметр волокон) приведены в табл. 2.

Существенное изменение морфологии покрытий приводит к значительному изменяет свойства поверхности [4], что подтверждается результатами измерения смачиваемости поверхности образцов, и в большей мере – поверхностной энергии, приведенными на рис. 2.

Таблица 2

Среднее значение толщины покрытия и диаметра волокна

Измеряемый параметр	Группа		
	2	3	4
Толщина покрытия, мкм	9,76	9,90	11,85
Диаметр волокон, мкм	–	–	0,16

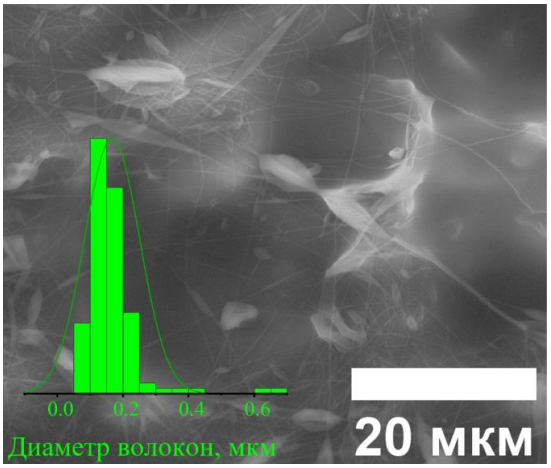


Рис. 1. СЭМ изображения поверхности образцов группы 4 при увеличении ×5000 и гистограмма распределения диаметров волокон

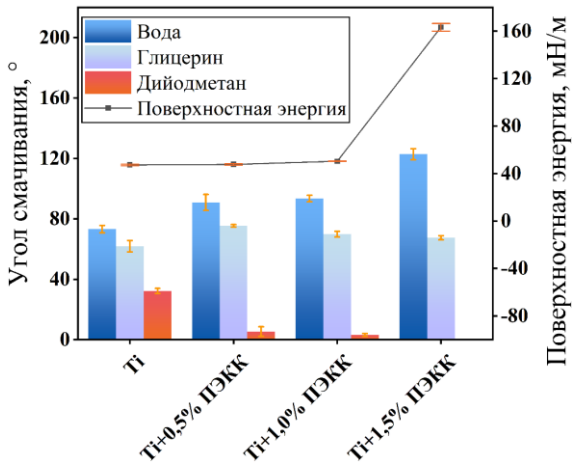


Рис. 2. Угол смачивания и поверхностная энергия

Анализ результатов измерений угла смачивания водой показал, что гидрофильные свойства покрытий существенно различаются. В группе 4 угол смачивания водой значительно увеличился, что обусловило проявление гидрофобных характеристик поверхности. Для расчёта поверхностной энергии (рис. 2) использовали результаты измерений контактных углов смачивания глицерином и дийодметаном.

Поверхностная энергия группы 4 значительно превышает аналогичный показатель остальных групп, что может быть объяснено наличием на поверхности образца волокнистых структур, изменяющих смачиваемость и поверхностную энергию [4]. Этот результат может иметь практическое применение, так как у различных типов имплантатов поверхность должны иметь гидрофобные или гидрофильные свойства, влияющие на адгезию и миграцию клеток.

Заключение. 1. Подобраны параметры электрораспыления раствора ПЭКК в гексафторизопропаноле, позволяющие формировать на Ti подложке покрытия с различной морфологией. 2. Одной из причин значительного повышения поверхностной энергии покрытий, сформированных на Ti электрораспылением раствора ПЭКК в гексафторизопропаноле 1,5 вес. %, является наличие в их микроструктуре волокон.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Characterization of polyaryletherketone (PAEK) filaments and printed parts produced by extrusion-based additive manufacturing / M. Garcia-Leiner et al. // Polymer international. 2021. Т. 70. № 8. С. 1128-1136.

2. Metal allergy in primary and revision total knee arthroplasty: a scoping review and evidence-based practical approach / H.E. Matar et al. // Bone & Joint Open. 2021. Т. 2. № 10. С. 785-795.

3. Polyimide films manufactured using partially wet electrospray deposition / B.J. Kingsley et al. // ACS Applied Polymer Materials. 2023. Т. 5. № 3. С. 1797-1809.

4. The role of the fiber/bead hierarchical microstructure on the properties of pvdf coatings deposited by electrospinning / A. Vicente et al. // Polymers. 2021. Т. 13. № 3. С. 464.

СИНТЕЗ ОРГАНИЧЕСКИХ КАРБОНАТОВ ИЗ КАТЕХОЛКАРБОНАТА И ГЕКСАНОЛА В ПРИСУТСТВИИ ЦЕОЛИТОПОДОБНЫХ ИМИДАЗОЛАТНЫХ КАРКАСОВ

А.С. Цыдыпова[1], Д.А. Архипов[2], С.А. Приходько[3], В.Н. Панченко[3], К.И. Шефер[1,3], В.И. Исаева[2], М.Н. Тимофеева[2,3]

[1]Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,
[2]Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН, г. Москва,
[3]Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, г. Новосибирск

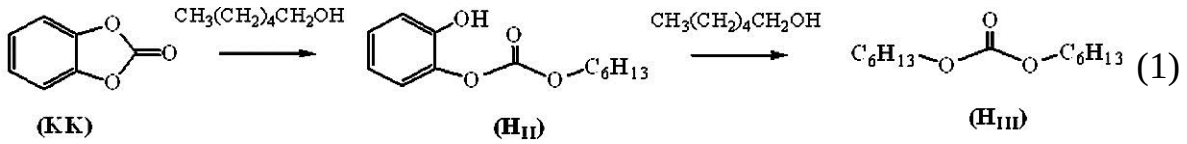
Аннотация. *В работе изучена реакция синтеза органических карбонатов из катехолкарбоната и гексанола в присутствии цеолитоподобных имидазолатных каркасов (ZIF), таких как ZIF-8, MAF-5, MAF-6 и MAF-32. Показано, что скорость реакции зависит от текстурных и структурных свойств, в то время как селективность по дигексилкарбонату от силы оснóвных центров.*

Ключевые слова: *цеолитоподобные имидазолатные каркасы, органические карбонаты, катехол карбонат, спирты, СВЧ-технологии*

Органические карбонаты являются органическими соединениями, широко использующиеся в различных областях химической промышленности как растворители и топливные присадки, а также как реагенты для синтеза продуктов в фармацевтической, смазочной и полимерной промышленности.

Методы получения органических карбонатов основаны на использовании токсичных реагентов, таких как фосген, оксид углерода и диметилсульфат. Реакция обмена карбонатов (CIR) позволяет получать органически карбонаты экологически безопасным методом.

В данной работе изучена реакция карбонатного обмена с использованием высокоактивной электрофильной молекулы, такой как катехолкарбонат (бензо-1,3-диоксолан-2-он, КК). Органические карбонаты были синтезированы путем переэтерификации КК гексанолом (схема 1), в присутствии цеолитоподобных имидазолатных каркасов (ZIF-8, MAF-5, MAF-6 и MAF-32).



(1)

Схема 1. Схема синтеза органических карбонатов из катехол карбоната и гексанола

Реакция между КК и гексанолом (схема 1) была исследована в присутствии ZIF при мольном соотношении гексанол/СС 6.6 и 10 масс.% катализатора (в расчете на массу КК) в атмосфере Ar при 60 °C. Согласно ГХ-МАСС основными продуктами были (2-гидроксифенил)-гексилкарбонат (H_{II}) и дигексилкарбонат (H_{III}).

Типичные кинетические кривые расходования КК и образования H_{II} и H_{III} в ходе реакции в присутствии MAF-5 показаны на рис. 1А. Характер этих кривых указывает на то, что реакция протекает в две стадии (схема 1). Продукт H_{II} образуется в результате реакции КК с первой молекулой гексанола, который затем реагирует со второй молекулой гексанола с образованием продукта H_{III}.

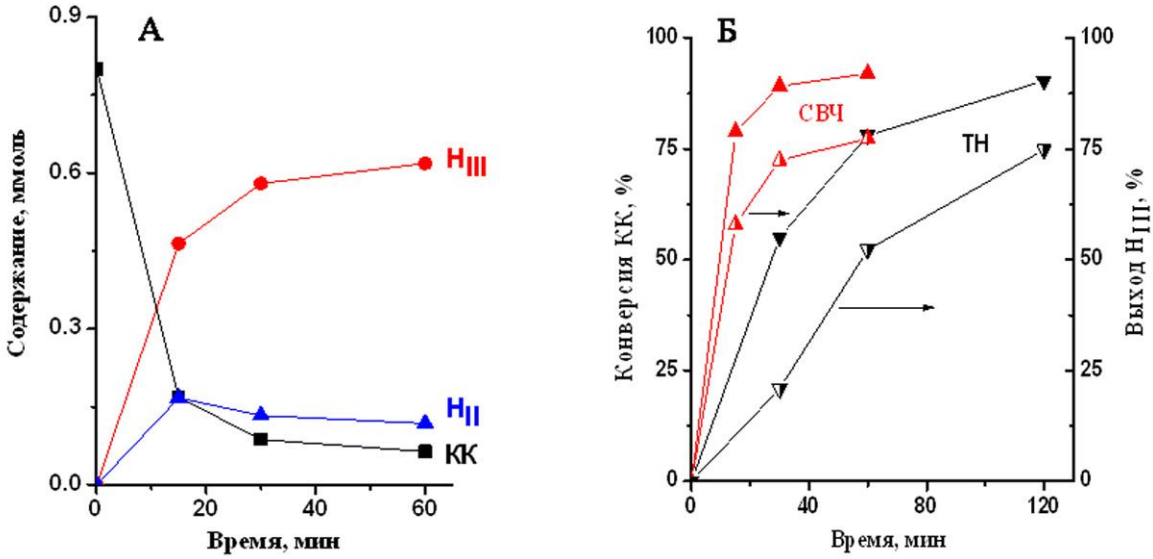


Рис. 1. (А) Кинетические кривые расходования КК,
и образования H_{II} и H_{III} в реакции между КК и гексанолом в присутствии MAF-5
в условиях СВЧ-нагрева. (Б) Кинетические кривые конверсии КК,
и выхода H_{III} в реакции между КК и гексанолом в присутствии MAF-5
в условиях СВЧ- и термического нагрева.

Установлено, что скорость изученных реакций зависят от силы основ́ных центров ZIFs и снижается в ряду MAF-32 > MAF-5 > MAF-6 > ZIF-8 (рис. 2А).

В то же время на селективность реакций по C_{III} и H_{III} влияет размер каналов ZIFs и снижается с уменьшением размера каналов в ряду MAF-6 > MAF-5 > ZIF-8 (рис. 2Б). Этот ряд коррелирует с пористостью материалов

и их текстурными свойствами. Низкая пористость MAF-32 (топология qtz, пористость 0 %) по сравнению с MAF-5 (топология ANA, пористость 38,6 %) и MAF-6 (топология RHO, пористость 55,4 %) приводит к снижению, как количества активных центров, так и их доступности для реагентов и интермедиата H_{II} для последующих превращений.

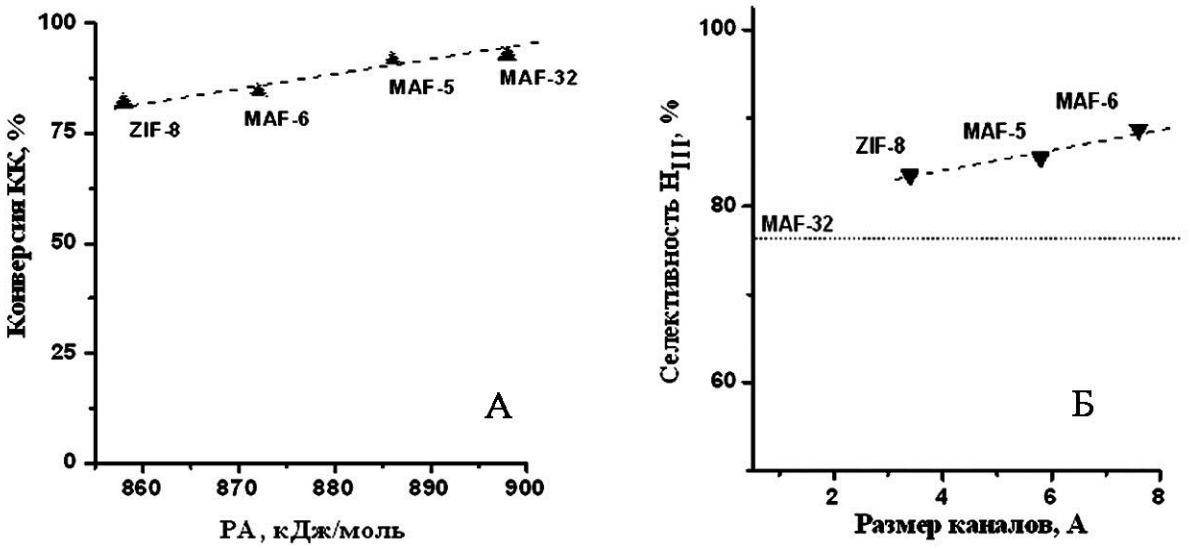


Рис. 2. (А) Корреляция между конверсией КК и силой основных центров (РА). (Б) Корреляция между размером каналов ZIFs и селективностью по H_{III}. (Экспериментальные условия: 0,8 ммоль КК, гексанол/КК – 15/1 моль/моль, 10 масс.% катализатора (в расчете на массу КК), 60 °С, 1 ч, СВЧ-нагрев)

Проведено сравнение каталитических свойств MAF-5 в реакции синтеза H_{III} из КК и гексанола в условиях микроволнового (СВЧ) и термического нагрева. Реакцию проводили при мольном соотношении гексанол/КК, равном 15, 10 масс. % катализатора (в расчете на массу КК) при 60 °С и 80 °С в условиях СВЧ- и термического нагрева (ТН), соответственно. Кинетические кривые конверсии КК и выхода H_{III} в этих условиях показаны на рис. 1А.

Хорошо видно, что превращение КК и выход H_{III} выше при проведении реакции в условиях СВЧ-нагрева. Так, 90 % конверсия КК и 75 % выход H_{III} при проведении реакции в условиях СВЧ-нагрева достигаются на 65 мин (55 мин при 60 °С) быстрее по сравнению с процессом в условиях ТН (120 мин при 80 °С).

Преимущества СВЧ-технологии объясняется высокими значениями коэффициентов поглощения катализатора, реагентов и продуктов реакции, что обеспечивает равномерный нагрев всего реакционного объема, «активацию» реагентов и, тем самым, способствует увеличению скорости реакции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН № FWUR-2024-0035).

ПОЛУЧЕНИЕ МУРАВЬИНОЙ КИСЛОТЫ ИЗ УГЛЕВОДНОГО СЫРЬЯ В ПРИСУТСТВИИ НАНЕСЕННЫХ V-СОДЕРЖАЩИХ КАТАЛИЗАТОРОВ

И.А. Черенков, Т.Б. Медведева, И.А. Лукоянов,
В.Н. Панченко, М.Н. Тимофеева, Н.В. Громов

Институт катализа
им. Г.К. Борескова СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация. *Для процесса окислительного превращения углеводсодержащего сырья (глюкозы, крахмала) приготовлены нанесенные ванадийсодержащие системы, представляющие собой оксидный носитель с закрепленными на его поверхности VO_x частицами. Показано, что на поверхности V-содержащих систем образуются преимущественно изолированные VO_x формы. В присутствии всех приготовленных катализаторов основным продуктом является муравьиная кислота с выходом 18-42 мол.%.*

Ключевые слова: *окисление, углеводная биомасса, муравьиная кислота, нанесенные V-содержащие катализаторы*

Муравьиная кислота (МК) широко используется в разных отраслях промышленности. Интерес исследователей к МК также связан с возможностью ее использования в качестве донора водорода. Сегодня МК можно получить из углеводсодержащего сырья – возобновляемого источника, путем его окислительного каталитического превращения («OxFA процесс»). Катализаторы данного процесса должны обладать кислыми центрами для расщепления гликозидной связи в полисахариде и OxRed-центры для окисления мономера до МК.

Эффективными катализаторами гидролиза-окисления или окисления являются растворимые бифункциональные Mo-V-P гетерополикислоты типа Кеггина (Mo-V-P ГПК), в присутствии которых выход МК может достигать 95 %.

Недостатками таких систем являются сложность отделения катализатора от продукта, а также их высокая загрузка, в связи с чем актуальным направлением представляется разработка новых твердых катализаторов для OxFA процесса.

В процессе окисления активным центром выступают ванадийсодержащие структуры, обладающие высоким окислительным потенциалом. Поэтому в нашей работе предложено использовать катализаторы, представляющие собой оксидный носитель с закрепленными на его поверхности ванадиевыми структурами. Такой дизайн позволит с бóльшей эффективностью вовлекать активные ванадиевые центры в процессе. Ванадийсо-

держащие нанесенные системы чаще используются в газофазных окислительных процессах. Использование их в жидкофазных процессах в литературе представлено незначительно [1].

Целью работы является исследование возможности применения нанесенных V-содержащих катализаторов в процессе окислительного превращения глюкозы и крахмала в муравьиную кислоту.

Приготовление каталитических систем осуществлялось пропиткой оксидных носителей (TiO_2 (P25), γ-Al_2O_3, SBA-15 и MoO_3) раствором оксалата ванадила (C_V = 79 мг/мл). Содержание ванадия составило 2 и 5 мас.%.

Согласно данным исследования катализаторов методом ЭСДО, на поверхности всех каталитических систем образуются преимущественно изолированные VO_x формы. Однако на спектре образца 5 %VO_x/SBA-15 наблюдается полоса, свидетельствующая об образовании полимерных $(VO_x)_n$ структур.

Текстурные характеристики катализаторов исследованы методом низкотемпературной адсорбцией N_2. Нанесение ванадия приводит к снижению удельной площади в 1,8-2 раза для систем на основе оксидов молибдена, алюминия и SBA-15 по сравнению с исходным материалом. В случае катализатора VO_x/TiO_2 $S_{уд}$ снижается на 8 $м^2/г$.

Испытание катализаторов проводилось в автоклаве высокого давления (Autoclave Engineers, США) при температурах 130 и 150 °С, давлении воздуха 20 атм и постоянном перемешивании (1000 об/мин, 7 ч). В течение эксперимента отбирались пробы и анализировались методами ВЭЖХ (Shimadzu, Япония) и на анализаторе общего органического углерода (TOC, AnalitikJena, Германия) [2].

Все катализаторы были испытаны в процессе окисления глюкозы и гидролиза-окисления крахмала. Муравьиная кислота является основным продуктом в жидкой фазе. При превращении глюкозы выходы МК находились в диапазоне от 20 до 31 мол.%. Увеличение загрузки V в составе VO_x/TiO_2 не влияет на выход целевого продукта. В случае остальных катализаторов с повышением загрузки ванадия наблюдается увеличение выходов МК.

Наиболее эффективным катализатором превращения глюкозы является VO_x/SBA-15 с загрузкой активного компонента, равной 5 мас.%, в присутствии которого достигается максимальный выход МК. При гидролизе-окислении крахмала выходы МК находятся в диапазоне от 18 до 42 мол.%. Для всех каталитических систем наблюдается увеличение выхода МК при увеличении загрузки ванадия. Наибольший выход достигается при использовании 5 % VO_x/MoO_3.

Важной характеристикой катализаторов является их стабильность. Поэтому все приготовленные ванадийсодержащие катализаторы были повержены гидротермальной обработке в условиях аналогичным экспериментам (150 °С, 20 атм, 7 ч). После обработки исследование растворов

методом АЭС-ИСП показало, что во всех системах наблюдается вымывание активного компонента. Степень вымывания ванадия составляет от 24 до 100 %.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного задания Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024-0036).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Álvarez-Hernández D., Ivanova S., Domínguez M.I., Blanes J.M.M., Centeno M.Á. V_2O_5/TiO_2 Catalyst for Catalytic Glucose Oxidation to Formic Acid in Batch Reactor: Vanadium Species Nature and Reaction Conditions Optimization // Topics in Catalysis. 2025. Т. 68, № 1. С. 49-58.

2. Gromov N.V., Medvedeva T.B., Lukoyanov I.A., Ogorodnikova O.L., Panchenko V.N., Parmon V.N., Timofeeva M.N. Hydrolysis-Oxidation of Starch to Formic Acid in the Presence of Vanadium-Containing Molybdophosphoric Heteropoly Acid ($H_{3+x}PMo_{12-x}V_xO_{40}$): Effect of Acidity and Vanadium Content on the Yield of Formic Acid // Renewable Energy. 2024. V. 220. 119534:1-12.

СИНТЕЗ СВЧ-МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИРКОНИЯ, ПРОМОТИРОВАННОГО СЕРНОЙ КИСЛОТОЙ, И ИХ ИСПЫТАНИЕ В ПРЕВРАЩЕНИИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ В ЦЕННЫЕ ПРОДУКТЫ

К.С. Черепанова, Т.Б. Медведева, А.В. Жужгов, Н.В. Громов

*Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, г. Новосибирск**

Аннотация. *В работе обсуждается исследование материалов на основе ZrO_2, промотированного H_2SO_4, приготовленных методом СВЧ обработки с применением математического планирования эксперимента. Многофункциональность ZrO_2 позволяет использовать данный материал в т.ч. и в области катализа. Приготовленные системы испытаны в реакции превращения целлюлозы, выделенной из биомассы мискантуса, в такие ценные продукты как глюкоза и 5-гидроксиметилфурфурол.*

Ключевые слова: *оксид циркония, СВЧ-синтез, сульфатированный оксид циркония, катализ, целлюлоза, глюкоза, 5-ГМФ.*

Оксид циркония ZrO_2 является уникальным материалом, который благодаря сочетанию разнообразных физико-химических свойств находит применение в различных областях. Среди направлений использования ок-

сида циркония следует отметить термостойкие покрытия и материалы в авиастроении и топливных элементах, биосовместимые материалы, применяемые в стоматологии и ортопедии, а также в областях электроники, оптики, фотонике и в качестве армирующих композитных добавок [1]. Многофункциональность ZrO_2 обусловлена возможностью адаптировать структуру и состав под конкретные задачи, а также использовать одни и те же свойства в разных контекстах.

Помимо перечисленных отраслей, интересно отметить использование (наноструктурированного) оксида циркония в катализе. Благодаря устойчивости к агрессивным средам, высокой прочности и гидротермальной стабильности данный оксид является перспективным катализатором для превращения растительной биомассы и ее компонентов в более ценные продукты.

Среди существующих методов приготовления оксида циркония (гидротермальный, золь-гель, соосаждение) в последнее время перспективным считается СВЧ-синтез. Данный метод позволяет сократить время синтеза, при этом минимизируя агломерацию частиц, а точная настройка параметров нагрева (мощность, время) позволяет управлять характеристиками материала. К тому же метод СВЧ синтеза существенно отличается своей энергоэффективностью.

В литературе уже существуют примеры применения оксида циркония в процессе каталитического превращения моносахаридов (глюкозы и фруктозы), полисахарида целлюлозы и растительной биомассы (отходы хлопкового стебля) для получения такого ценного соединения как 5-гидроксиметилфурфурол (5-ГМФ) [2]. Помимо центров Льюиса, присущих цирконию (необходимы для стадии изомеризации глюкозы во фруктозу), для данного процесса также необходимы и центры Бренстеда (стадии гидролиза полисахарида и дегидратация фруктозы в 5-ГМФ), которые могут быть введены в каталитическую систему после ее промотирования серной кислотой.

В работе обсуждается разработка катализаторов на основе ZrO_2, промотированного H_2SO_4, приготовленных методом СВЧ обработки, условия синтеза которого подобраны математическим планирования эксперимента, для процесса превращения целлюлозы в глюкозу и 5-ГМФ.

В ходе выполнения работы синтезирована линейка материалов ZrO_2-S, в которую вошли 15 образцов, приготовленных методом СВЧ-обработки (Pyro, Milestone) нитрата цирконила (AcrosOrganics), пропитанного серной кислотой (Acros Organics). С помощью ПО «DesignExpert» подобраны условия обработки систем: содержание S в качестве промотора – 1/4.5/8 мас.%, время СВЧ обработки – 0/5/10 мин, температура обработки – 250/285/320 °С (Р – 1000 Вт, время нагрева – 30 мин). Катализаторы испытаны в процессе гидролиза-дегидратации целлюлозы, выделенной из биомассы мискантуса методом 3-стадийной обработки [3], при следующих

условиях: T – 190 °C, p (Ar) – 10 атм, катализатор/субстрат – 1/16, 7 ч, водная среда. Приготовленные катализаторы исследованы физико-химическими методами: низкотемпературной адсорбции N_2 ($S_{БЭТ}$ – 77-125 $м^2/г$, $V_{пор}$ – 0,15-0,25 $см^3/г$, $D_{пор}$ – 5,81-8,27 нм), РФА, ИК, pH суспензии. (2.7-3.4), ТПД NH_3 (0,207-1,065 ммоль/г). По результатам $S_{БЭТ}$ была получена регрессионная модель, позволяющая описать $S_{БЭТ}$ от варьируемых параметров:

$$S_{БЭТ} = 91{,}89 + 0{,}50 \cdot X_S - 13{,}70 \cdot X_T - 2{,}20 \cdot X_t - X_S \cdot X_T + 1{,}25 \cdot X_S \cdot X_t + 0{,}75 \cdot X_T \cdot Xt + 9{,}77 \cdot {X_S}^2 + 1{,}77 \cdot {X_T}^2 + 3{,}27 \cdot {X_t}^2 \quad (1)$$

где X_S – доля промотора по S, %; X_T – T обработки, °C, X_t – t выдержки после нагрева, мин. Данная модель также позволила сделать следующие выводы: 1) при загрузке промотора 1 мас.% S область высокой $S_{БЭТ}$ наблюдается при минимальной T и t выдержки. Увеличение загрузки серы до 4,5 мас.% приводит к смещению изолиний в область меньших значений. Однако дальнейшее увеличение доли промотора привело к обратному смещению изолиний, что обуславливает U-образный вид зависимости. 2) Увеличение T обработки приводит к снижению значений $S_{БЭТ}$. 3) Увеличение t обработки также ведет к смещению изолиний в область более низких значений, что, как и во втором случае, предположительно связано с перестройкой структуры. Согласно данным РФА, все образцы ZrO_2- S имеют рентгеноаморфную структуру. Данные ИК-спектроскопии подтверждают введение сульфогрупп в виде мономерных и димерных форм в состав катализатора.

Испытания катализаторов ZrO_2- S в гидролизе-дегидратации выделенной из мискантуса целлюлозы показало, что основными продуктами являлись 5-ГМФ и глюкозы. Увеличение доли промотора с 1 до 4,5 мас.% привело к увеличению выхода 5-ГМФ и общего выхода продуктов (35 мол.%).

Однако испытания катализаторов S-8 показали снижение эффективности из-за высоких скоростей гидролиза и образования гуминов (суммарный выход глюкозы и 5-ГМФ до 25 мол.%).

Работа выполнена при поддержке Министерства высшего образования и науки РФ (проект государственного задания Института катализа СО РАН, FWUR-2024-0036)

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zirconium Oxide. 2025. URL: https://material-properties.org/zirconium-oxide/ (дата обращения 01.05.2025)

2. Catalytic Production of 5-HMF from Biomass and Biomass-Derived Sugars // Production of Platform Chemicals from Sustainable Resources / Fang Z. Tong X., Xue S., Hu J. et al. Singapore: Springer Singapore, 2017. С. 1-121.

3. Cherepanova K.S., Gromov N.V., Medvedeva T.B. Environmentally Friendly Hydrolysis-Dehydration of Oat Husk and Its Main Components into 5-HMF and Furfural in the Presence of Solid and Soluble Acid Catalysts // Catalysis: from science to industry : Proceedings of VII International scientific school-conference for young scientists. Томск: ТГУ, 2022 С. 97.

ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА ПОД ВЛИЯНИЕМ ГЕЛЕОБРАЗУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Н.Д. Шапкин, М.В. Филиппов
Научный руководитель д.ф.-м.н., профессор Джимак С.С.

Кубанский государственный университет г. Краснодар

Аннотация. *В статье представлена комплексная оценка влияния гелевых композиций на формирование нанокластеров серебра различного размера, что позволяет подобрать подходящий гелеобразующий агент для различных областей применения.*

Ключевые слова: *наночастицы серебра, гелеобразователи*

В последние десятилетие идет активное изучение наноматериалов и связующих с ними элементов. Особое внимание привлекли наночастицы серебра и антибактериальные свойства, которыми они обладают. Кроме того, сейчас также изучают различные факторы, которые могут изменить морфологические свойства наночастиц, что в результате приводит к изменению их свойств.

К корректировке характеристик наночастиц также может привести изменение концентраций растворов в процессе синтеза или внешнего воздействия [1, 2]. Кроме того, возможное воздействие оказывают гелеобразующие агенты, которые входят в состав композиций. Особое внимание гелеобразователям в сочетании с наночастицами серебра уделено в результате их применения в клинической практике при лечении кожных поражений, ран и язв [3, 4].

Для целей медицинской и биологической направленности использование гелеобразователей представляет собой важный этап при создании функциональных композиций. Гелеобразующие компоненты создают трёхмерную сетчатую структуру, которая удерживает наночастицы, что обеспечивает долговременную стабильность материала, кроме этого, в зависимости от гелеобразователя в композиции могут проявляться дополнительные свойства, такие как адгезия к биологическим тканям или контроль размера наночастиц, что повышает антибактериальные свойства. В статье [5] рассматривается использование гелеобразователя на основе желатина

в композиции с коллоидным серебром, что позволяет наделить полотно антисептическими свойствами. Кроме того, в работе описан процесс создания ткани с биоцидными характеристиками, которая сохраняет свои свойства после нескольких обработок. Кроме желатина широким спектром применений, как гелеобразующий агент, обладает соединение на основе альгината. Была разработана гелевая система на основе альгината, в которую были входили наночастицы серебра и пероксид кальция.

Полученный материал характеризовался пористой морфологией и равномерным распределением компонентов, что обеспечивало выраженный антимикробный эффект в отношении грамположительных бактериальных биоплёнок [6].

Применение желатина в качестве гелеобразователя при синтезе композитных гидрогелей с наночастицами серебра позволяет получить материалы с антисептическими свойствами, а также со значительной прочностью и адгезионной способностью, что делает их перспективными для использования в составе многослойных раневых покрытий [7]. Примером использования раневого покрытия на основе альгината и наночастиц серебра можно наблюдать в работе [8], где оценивали его влияние на лабораторных животных. Таким образом, как желатин, так и альгинат представляют собой востребованные гелеобразующие агенты, активно применяемые в биомедицине, прежде всего при создании многофункциональных раневых покрытий. Однако степень влияния самих агентов на формирование и морфологию наночастиц серебра в составе композиций остаётся недостаточно изученной.

С учётом изложенного, основная цель данного исследования заключалась в определении влияния гелеобразующих веществ на физико-химические характеристики наночастиц серебра, сформированных в составе комбинированных гелевых систем на основе желатина и натриевого альгината.

В результате исследования микрофотографий установлено, что использование альгината или желатина в составе композиции оказывает различное влияние на морфометрические характеристики и количественное распределение наночастиц серебра (AgNPs). Так в случае применения альгината в качестве гелеобразователя были зафиксированы крупные скопления превышающие 100 нм в диаметре.

Данные скопления состояли преимущественно из 9-15 укрупнённых нанокластеров округлой формы, размер которых, как правило, превышал 40 нм (рис. 1 А). Также было установлено, что применение альгината натрия способствовало образованию более чем 50 % наночастиц в диапазоне размеров от 41 до 100 нм, что подтверждено статистически значимыми различиями ($p < 0,05$). При этом доля более крупных агломератов, превышающих 100 нм в диаметре, оставалась незначительной и не превышала 5 % от общего количества частиц. Наиболее биологически активная фрак-

ция, включающая наночастицы диаметром менее 15 нм, составила лишь около 10 % от совокупного объёма AgNPs. В случае гелевой композиции на основе желатина анализ показал, что распределение AgNPs по размерным группам существенно отличается от такового при использовании альгината натрия. Диапазон наночастиц при использовании желатина не превышает 40 нм (рис. 1 Б).

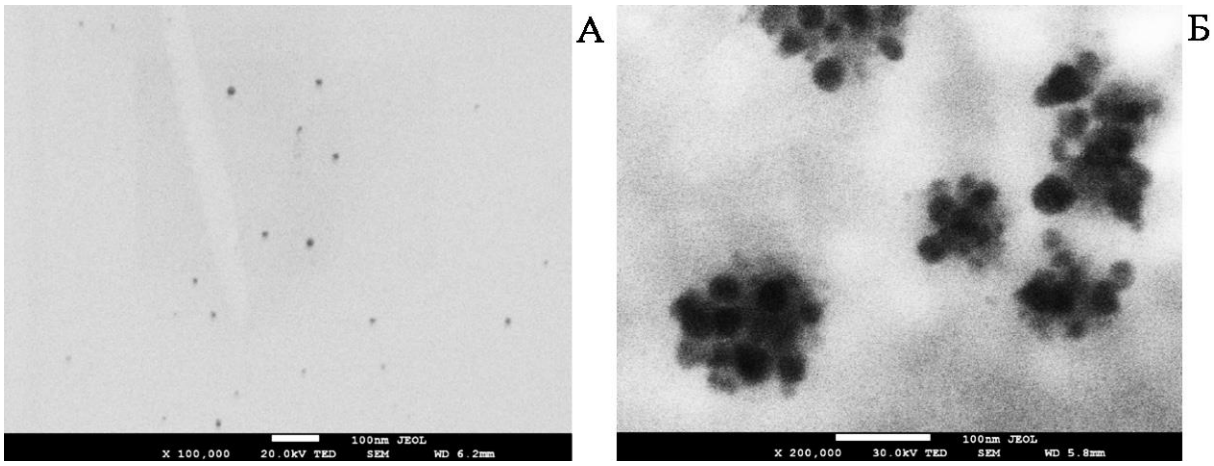


Рис. 1. Электронная микрофотография гелевой композиции, увеличение 200.000 и 100,000 раз, в режиме детектирования обратно рассеянных электронов («COMPO»), в качестве гелеобразователя использован альгинат натрия (А) и желатин (Б)

При детальном сравнении гелевых композиций на основе альгината или желатина было обнаружено, что общее количество наночастиц при использовании желатина в размерном диапазоне от 1 до 15 нм составляет около 76 % в то время, как при использовании альгината количество наночастиц в этом диапазоне не превышает 12 % (рис. 2).

В диапазоне наночастиц диаметром менее 26 нм, при использовании желатина их количество от общего числа составляет около 23,8 %, в случае альгината количество наночастиц данного диапазона составляет около 8 %. Также при использовании желатина наночастицы в размерном диапазоне, превышающем 26 нм, отсутствуют, в то время как при использовании альгината в этом диапазоне содержится более 70 % всех наночастиц, также стоит отметить, что при использовании желатина общее количество наночастиц по сравнению с альгинатом двукратно меньше.

На основании полученных экспериментальных данных можно сделать несколько выводов. Во-первых, применение желатина в роли гелеобразующего компонента способствует сохранению исходных морфологических и функциональных характеристик, однако его основным недостатком являются механические свойства системы на его основе. В частности, параметры плотности, эластичности и способности к сорбции могут оказаться недостаточными для обеспечения полного соответствия требованиям,

предъявляемым к биомедицинским материалам, предназначенным для раневой терапии [9, 10]. Во-вторых, хотя применение альгината в качестве гелеобразователя с концентрацией 0,9 % и вызывает образование относительно крупных наночастиц, однако это может быть вызвано концентрацией самого гелеобразователя.

К данному предположению склоняет работа [6], где авторы отметили образование относительно крупных наноструктур при использовании микрофлюидной платформы и введении в реакционную зону сильно концентрированных растворов, необходимых для генерации AgNPs, с высокой скоростью.

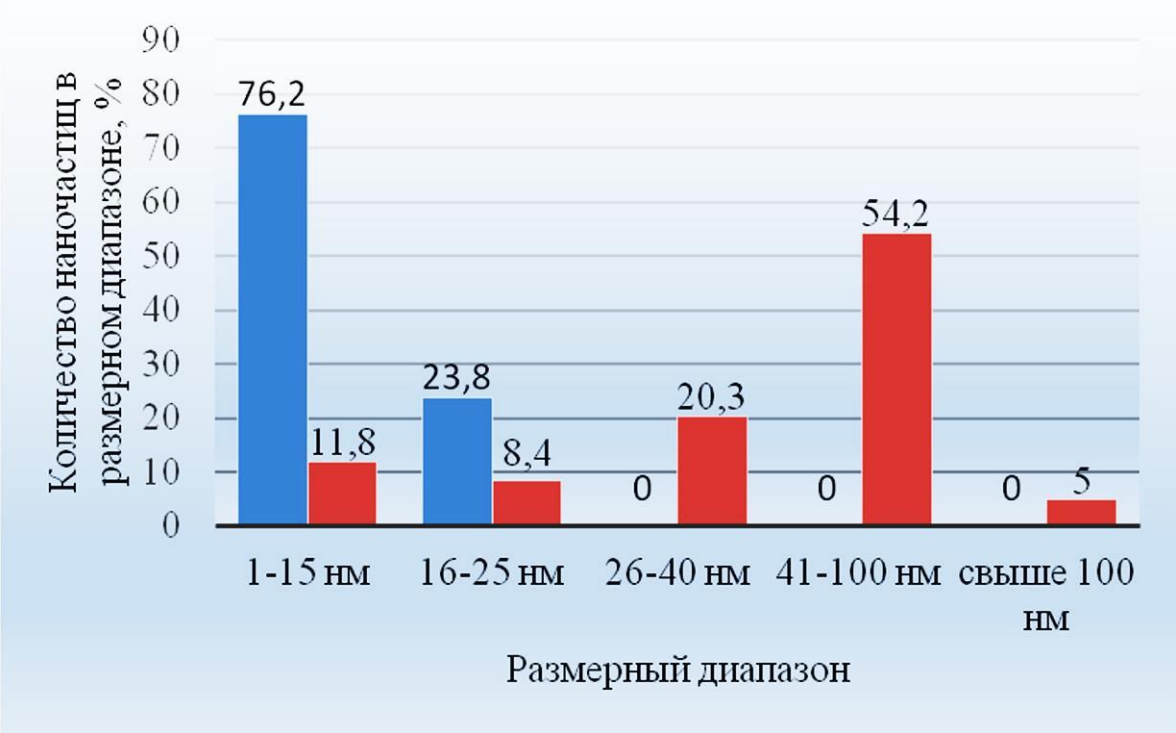


Рис. 2. Процентное сравнение наночастиц серебра в пределах различных размерных диапазонов при использовании разных гелеобразователей на основе желатина и альгината

Полученные в настоящем исследовании данные позволяют выдвинуть предположение, что снижение концентрации альгината в составе композиции может быть перспективным направлением для получения более диспергированных систем с высоким содержанием функционально активных нанофракций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Influence of silver ion content on nanoparticle size obtained by cavitation-diffusion photochemical reduction / Shashkov D.I., Kopytov G.F., Basov A.A., Malyshko V.V., Barysheva E.V., Sokolov M.E., Moiseev A.V., Esaulenko

E.E., Shapkin N.D., Korzhov A.N., Isaev V.A., Dorokhova A.A. // Russian Physics Journal, 2024, 67 (4), P. 464-470.

2. The influence of ultraviolet radiation intensity on the formation of silver nanoparticles by cavitation-diffusion photochemical reduction / Kopytov G.F., Shashkov D.I., Basov A.A., Malyshko V.V., Sokolov M.E., Storozhuk A.P., Moiseev A.V., Barysheva A.M., Zubova N.V., Isaev V.A., Dorokhova A.A. // Russian Physics Journal, 2024, 67 (2), P. 156-161.

3. Plaster gel loaded with silver nanoparticle-mediated Ganoderma applanatum: From fabrication to evaluation Maneewattanapinyo P., Monton C., Pichayakorn W., Dangmanee N., Wunnakup T., Suksaeree J.. AAPS PharmSciTech. 24 (5). 105 (2023). https://doi.org/10.1208/s12249-023-02566-z

4. Immunomodulatory Antibacterial Hydrogel for Wound Infection Management / Han J., Meng Q., Liu T., Lv M., Su W., Liu B., Wu J. // Int. J. of Nanomedicine. 19. 8159-8174 (2024). https://doi.org/10.2147/IJN.S472107

5. Баранова О.Н., Золина Л.И. Целлюлозные полотна, модифицированные гидрозолем серебра с применением растительных дубителей. Москва, 2012. С. 29.

6. Infection-Free and Enhanced Wound Healing Potential of Alginate Gels Incorporating Silver and Tannylated Calcium Peroxide Nanoparticles / Bîrcă A.C., Gherasim O., Niculescu A.G., Grumezescu A.M., Vasile B.Ș., Mihaiescu D.E., Neacșu I.A., Andronescu E. Trușcă R., Holban A.M., Hudiță A., Croitoru G.A. // Int. J. Mol. Sci. **25** (10). 5196 (2024). https://doi.org/10.3390/ijms25105196.

7. Sustained-release, antibacterial, adhesive gelatin composite hydrogel with AgNPs double-capped with curdlan derivatives / Zhang Y., Zhang Y., Jian M., Pei Y., Liu J., Zheng X., Tang K. // Int. J. Biol. Macromol. **277** (2). 134222 (2024). https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134222.

8. Влияние альгинатно-тканевого покрытия с наночастицами серебра на течение раневого процесса у лабораторных животных / Малышко В.В., Федулова Л.В., Соколов М.Е., Моисеев А.В., Басов А.А., Дорохова А.А., Шашков Д.И., Джимак С.С. // Биофизика. 2023. Т. 68. № 2. С. 376-383.

9. Gao Y., Zhang X., Jin X. Preparation and properties of minocycline-loaded carboxymethyl chitosan gel/alginate nonwovens composite wound dressings // Mar Drugs. **17** (10), 575 (2019). https://doi.org/10.3390/md17100575.

10. Biological properties of sulfanilamide-loaded alginate hydrogel fibers based on ionic and chemical crosslinking for wound dressings / Sun X., Ma C., Gong W., Ma Y., Ding Y., Liu L. // Int. J. Biol. Macromol. **157**. 522-529 (2020). https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.210.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА $AlFeNiCoCrNb_{0.25}$

Ж.Г. Ковалевская, Ю. Лю
Научный руководитель: д.т.н., профессор Ковалевская Ж.Г.

Томский политехнический университет, г. Томск

Аннотация. *В статье предложено влияние термообработка на механические свойства высокоэнтропийного сплава $AlFeNiCoCrNb_{0,25}$. Проведен анализ металлография и изменение микротвердости, результаты отражены в литом состоянии и после термообработки сплав сохранит стабильный твердый раствор на основе ОЦК фаза. Термообработка при температуре 900 °C приводит к образованию новых фаз σ междендритов в сплаве и твердость сплава увеличивается на 40 %. При более высоких температурах твердость сначала уменьшение, затем увеличение, за счет превращения исходной фазы ГЦК в фазы ОЦК.*

Ключевые слова: ***в****ысокоэнтропийный сплав, термическая обработка, микроструктура, микротвердость*

Введение: Уже больше двадцати лет мировое сообщество материаловедов создает и исследует новую группу металлических сплавов, названных высокоэнтропийными сплавами (ВЭС) [1-4]. На данный момент одним из наиболее изучаемых высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) является система AlCoCrFeNi с добавлением пятого компонента. Легирование Nb способствует образованию в сплаве твердого раствора и вторичной фазы Лавеса благодаря своему большому атомному размеру, способствует сильному искажению кристаллической решетки сплава на кристаллическом уровне, что повышает механические свойства сплава. Оптимальный комплекс механических свойств формируется в сплаве доэвтектического состава $AlCoCrFeNiNb_{0,25}$. Именно этот сплав был выбран авторами работы для дальнейшего исследования.

Результат и обсуждение

На рис.1 показано микроструктура сплава $AlCoCrFeNiNb_{0,25}$. в литом состоянии и после термообработки. Во всех случаях сплав имеет дендритную морфологию со структурой доэвтектического сплава. Основой структуры являются дендриты и эвтектика в междендритном пространстве. Дендриты представлены ОЦК-фазой, эвтектика представляет смесь фазы ОЦК и фазы Лавеса. Фаза ОЦК, обогащена Ni и Al. Nb частично растворяется в фазе ОЦК, частично входит в состав фазы Лавеса [5]. Вторичная фаза Лавеса образуется по границам твердого раствора в процессе формирования дендритов и обусловлена снижением растворимости ниобия в твер-

дом растворе основных компонентов в процессе охлаждения, Cr и Nb в основном обогащены в межразветвленной области. При температуре 900 °C в сплаве происходит амплитудно-модуляционный распад с образованием новой фазы – σ фаза обогащенной Cr+Fe, которая растворяется в матрице при более высоких температурах. При температуре 1100 °C в междендритном пространстве мы наблюдаем совершенные зерна эвтектики.

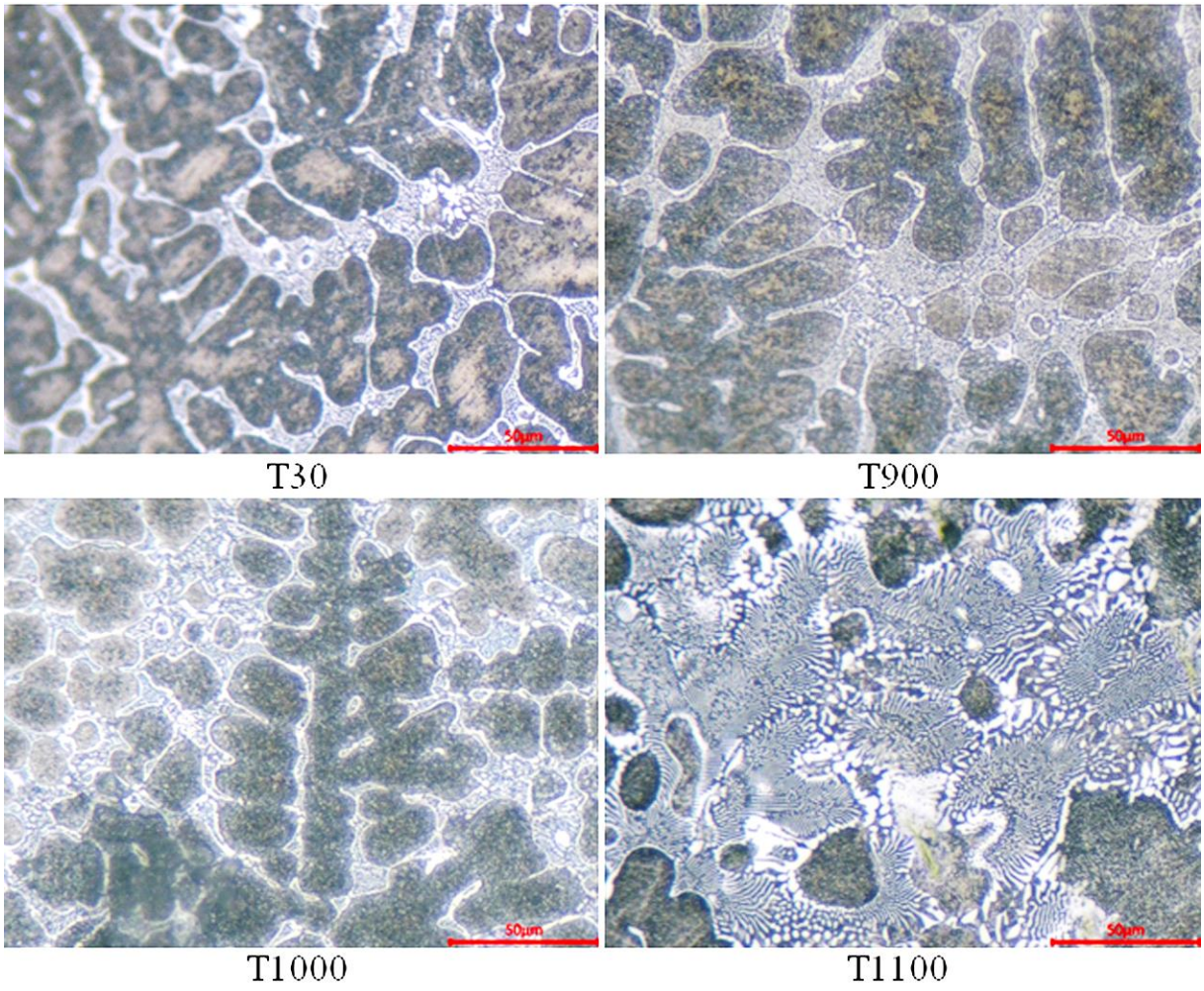


Рис. 1. Микроструктура сплавов $AlFeNiCoCrNb_{0,25}$
в литом состоянии и после термообработки

На рис 2 показано значение средней микротвердости, при всех режимах воздействия на материал микротвердость в междендритной зоне выше, чем в дендритах.

В исходном образце в дендритах самое высокое значение микротвердости. Это обусловлено особым строением твердого раствора основных компонентов сплава, формирующегося в процессе кристаллизации. Нагрев сплава при термообработке сплава твердость имеет тенденцию к увеличению, а затем к уменьшению, причем основной областью увеличения твердости является эвтектика. При температуре 900 °C в районе эвтектики обладает самым большом значением, это определяется по появление σ фазы

и Лавес-фазы. С увеличением температуры σ фаза растворяется в матрице, при выше температуре 1100 °С в сплаве ГЦК фаза переходит на ОЦК фаза, и проводит к повышению микротвердости.

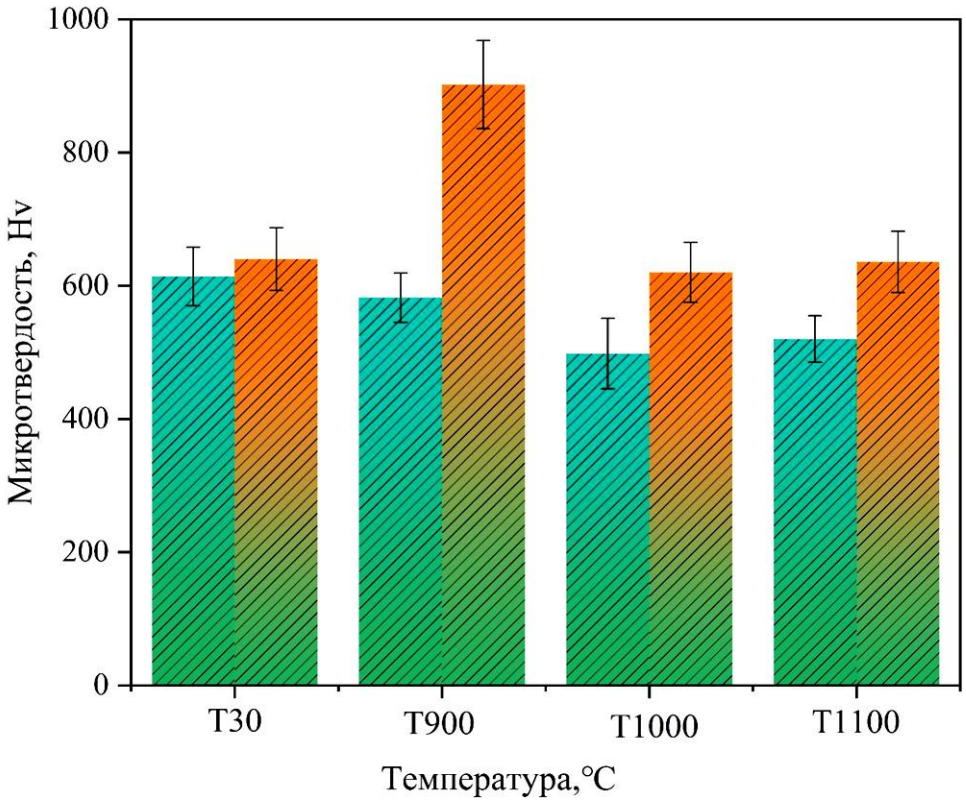


Рис. 2. Микротвердость сплава $AlFeNiCoCrNb_{0,25}$ в литом состоянии и после термообработки в дендрите и эвтектике

Вывод:

1. После легирования сплава AlFeNiCoCr 0,25 моль Nb сплав сохраняет фазу ОЦК как в литом, так и в термообработанном состоянии и получаемая структура в сплаве состоит из дендритов твердого раствора и эвтектики с фазой Лавеса в междендритном пространстве.

2. Термообработка при 900 °С приводит к появлению в сплаве новых фаз σ, в основном в междендритной области, что существенно повышает твердость сплава.

3. При более высоких температурах сигма фаза растворяется в матрице, а исходная фаза ГЦК превращается в фазу ОЦК, при этом твердость имеет тенденцию к увеличению, а затем к уменьшению перед увеличением.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes / J.W. Yeh, S.K. Chen, S.J. Lin,

J.Y. Gan, T.S. Chin, T.T. Shun, C.H. Tsau, S.Y. Chang // Advanced Engineering Materials. 2004. Vol. 6. P. 299-303.

2. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys / B. Cantor, I.T. Chang, P. Knight, A.J.B. Vincent // Materials Science and Engineering: A. 2004. Vol. 375. P. 213-218.

3. Применение высокоэнтропийных сплавов / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, К.А. Осинцев, Ю.А. Рубанникова, О.А. Перегудов, А.П. Семин // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 10. С. 747-754.

4. Обзор исследований сплавов, разработанных на основе энтропийного подхода / З.Б. Батаева, А.А. Руктуев, И.В. Иванов, А.Б. Юргин, И.А. Батаев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2021. Т. 23. № 2. С. 116-146.

5. Ma S.G., Zhang Y. Effect of Nb addition on the microstructure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy // Materials Science and Engineering: A. 2012. Vol. 532. P. 480-486.

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ НАГРУЗКИ НА ИМПЛАНТАТ ТИТАНОВОЙ ПЛАСТИНЫ ГОЛЕНИ ДЛЯ ОСТЕОСИНТЕЗА

А.С. Бережная
Научный руководитель: д.т.н., профессор Пичхидзе С.Я.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В данной статье проведен анализ ключевых механических свойств титановых сплавов, проведен анализ нагрузки на имплантат титановой пластины голени.*

Ключевые слова: *титан, имплантат, нагрузка, остеосинтез*

Современная травматология и ортопедия предъявляют высокие требования к материалам, используемым для остеосинтеза. Титановые сплавы, благодаря уникальному сочетанию прочности, биосовместимости и коррозионной стойкости, стали золотым стандартом в производстве имплантатов для фиксации переломов. Особое значение имеет выбор оптимального сплава для пластин остеосинтеза голени, которые подвергаются значительным циклическим нагрузкам в процессе жизнедеятельности пациента [1-8].

Цель работы: определить оптимальный титановый сплав для пластины голени на основе анализа механических характеристик, обеспечить соответствие медицинским требованиям по прочности и гибкости.

Методология: для данного исследования были выбраны следующие сплавы:

1. Ti-6Al-4V (Grade 5)
2. Ti-6Al-7Nb
3. Ti-3Al-2.5V
4. Чистый титан (Grade 4)

Для каждого материала были определены следующие параметры:

• Твёрдость (HV): измеряется с помощью твердомера,

• Прочность на разрыв (МПа): определяется в результате испытаний на растяжение,

• Прочность на изгиб (МПа): оценивается в ходе испытаний на изгиб,

• Относительное удлинение (%): измеряется как процентное изменение длины образца до разрушения,

• Упругость на изгиб (МПа): оценивается по способности материала восстанавливать свою форму после деформации.

Все испытания проводились в соответствии со стандартами ASTM D638 и ASTM D790. Результаты исследований, иллюстрирующих механические свойства различных титановых сплавов для пластины, приведены на рис. 1.

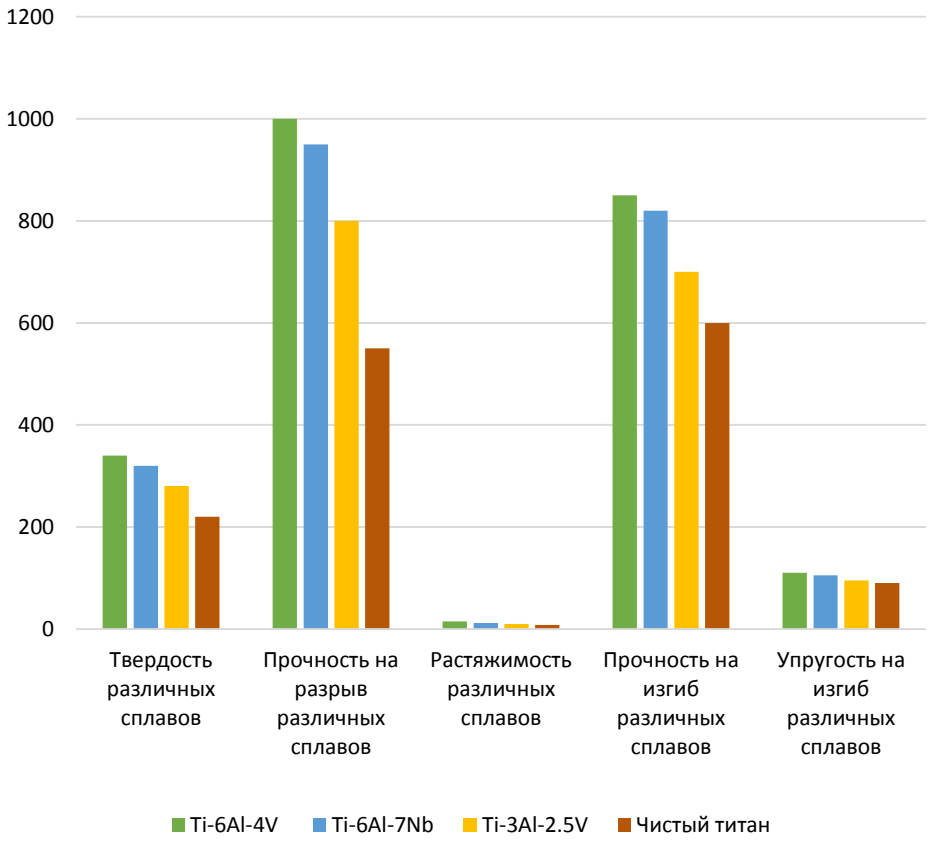


Рис. 1. Механические свойства титановых сплавов [5-8]

Результаты: ниже приведены следующие свойства титановых сплавов:

1. Твёрдость: Наибольшая твёрдость у Ti-6Al-4V (340 HV), что обеспечивает устойчивость к деформации.

2. Прочность на разрыв: Ti-6Al-4V (1000 МПа), что указывает на его способность выдерживать значительные нагрузки.

3. Растяжение: Ti-3Al-2.5V: 15 % (наибольшая пластичность)

4. Прочность на изгиб: Ti-6Al-7Nb: 850 МПа.

5. Упругость на изгиб: Ti-6Al-4V (110 ГПа), что указывает на его способность восстанавливать форму после нагрузки.

Исследование механических свойств титановых сплавов показало значительное разнообразие характеристик, что позволяет выбрать материалы в зависимости от конкретных требований к изделию. Наилучшие комплексные характеристики демонстрирует Ti-6Al-4V: высокая твёрдость (340 HV), прочность на разрыв (1000 МПа) и упругость (110 ГПа). Запас прочности конструкции варьируется от 2,5 (при экстремальных нагрузках) до 10 (при стандартных), что соответствует требованиям остеосинтеза.

Для исследования взята модель пластины для остеосинтеза голени с размерами 120 × 15 × 4 мм, рис. 2. Расчеты проведены в программе Компас-3D.

Наилучшие комплексные характеристики демонстрирует Ti-6Al-4V: высокая твёрдость (340 D), прочность на разрыв (1000 МПа) и упругость (110 ГПа). Запас прочности конструкции варьируется от 2,5 (при экстремальных нагрузках) до 10 (при стандартных), что соответствует требованиям остеосинтеза. Зависимость максимальных напряжений по Мизесу от приложенных давлений приведена на рис. 6. Видно, что модель пластины для остеосинтеза достаточно прочная.

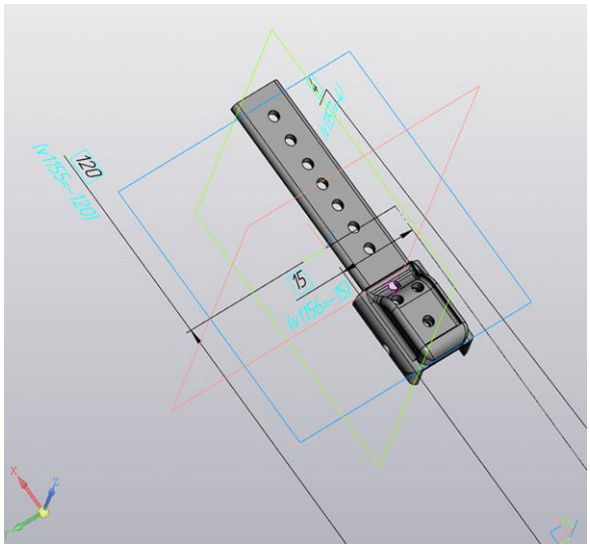


Рис. 2. Модель пластины для остеосинтеза

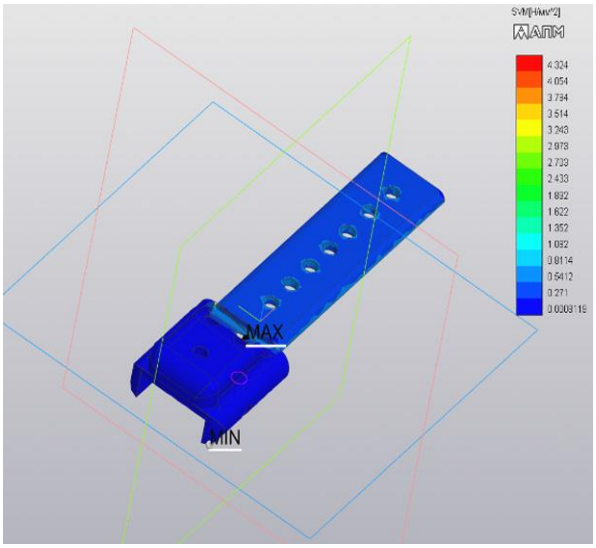


Рис. 3. Результаты расчёта статических напряжений по Мизесу при 1,1 Н/мм^2

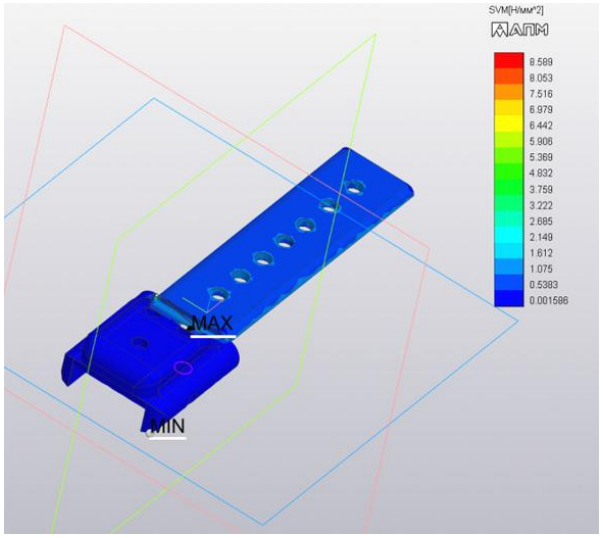


Рис. 4. Результаты расчёта статических напряжений по Мизесу при 2,2 Н/мм^2

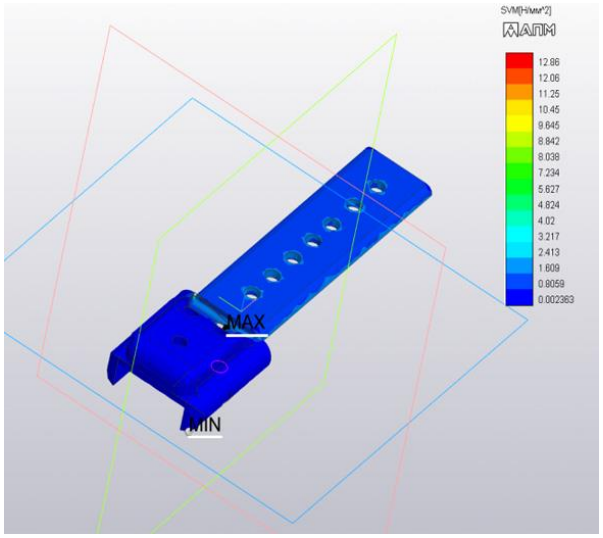


Рис. 5. Результаты расчёта статических напряжений по Мизесу при 3,3 Н/ мм^2

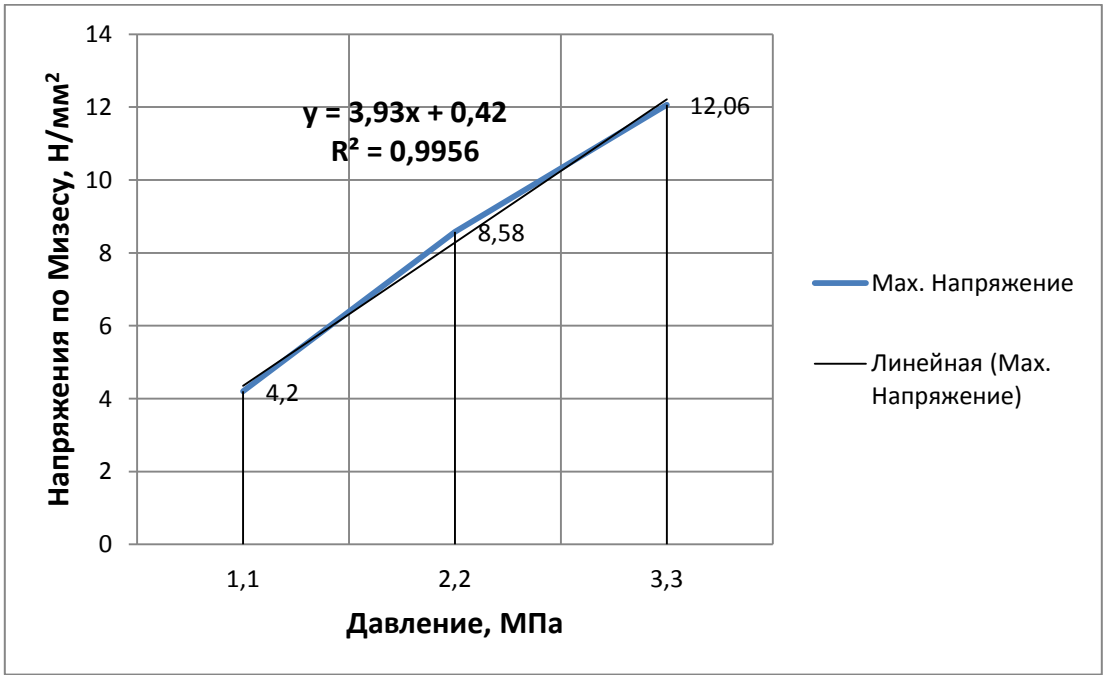


Рис. 6. График зависимости напряжений по Мизесу от приложенного давления

Выводы: 1) подобран титановый сплав для изготовления пластины для голени, а именно Ti-6Al-4V. Сплав показал наибольшие подходящие характеристики при испытаниях; 2) показано, что данная конструкция может выдерживать требуемые напряжения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. https://titanmed.ru/production/plastiny-pri-perelomakh/plastiny-pri-perelome-goleni.html

2. ASTM E8/E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials

3. ASTM E290 Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility.

4. ASTM D2240 Standard Test Method for Rubber Property–Durometer Hardness.

5. http://m.ru.yunchtitanium.com/info/mechanical-properties-of-titanium-and-titanium-46738863.html

6. https://abatmenty.ru/spravochnik/podrobnyj-analiz-titanovyh-splavov-v-rossijskoj-stomatologii

7. https://detalmach.ru/spravka365.html

8. https://alloysintl.com/ru/titanium-alloys-supplier/titanium_3-2-5/

РАСЧЕТ ПОРШНЯ ВОДОРОДНОГО ДВИГАТЕЛЯ

М.В. Косынкин
Научный руководитель: д.т.н., профессор Пичхидзе С.Я.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В статье проведены расчеты параметров поршня двигателя ВАЗ 2105 для работы на водороде. Расчеты позволили сделать вывод, что использовать стандартные поршни крайне затруднительно. Все посчитанные параметры близки к граничным для алюминия марки АЛ2 значениям, а некоторые, например, напряжение сжатия в головке поршня превышают их. Для сравнения был проведен анализ идентичного поршня из алюминия марки АК4-1 по результатам которого выяснилось, что данный сплав лучше подходит для использования в водородном ДВС.*

Ключевые слова: *поршень, водородный двигатель, расчет*

В современном мире всё чаще идут разговоры о глобальном топливно-энергетическом кризисе, который может быть вызван нестабильными ценами на энергоносители. Не стихают рассуждения об ухудшающейся экологии и одной из причин считают сжигание углеродного топлива. В такой обстановке многие исследователи ищут альтернативные варианты топлива с учетом установившейся инфраструктуры. За последний век человечество создало обширную систему использования продуктов переработки нефти в качестве основных вида топлива.

Переход на альтернативу в виде электричества уже сейчас не оправдывает своих ожиданий. Без глобальной перестройки инфраструктуры

электромобили оказываются неликвидны, а их жизненный цикл оставляет больший углеродный след, чем у классического автомобиля с ДВС.

Водородное топливо в свою очередь является перспективнее. Его сгорание происходит без выбросов углекислого газа, наличие инфраструктуры ГАЗС позволяет внедрять его с меньшими денежными затратами, а схожесть принципиальной конструкции с классическим ДВС удешевляет разработку и производство. Исходя из этого возникают идеи о модификации двигателей для использования в них водорода в качестве топлива. Однако требования к ДВС на водороде жестче в ряду некоторых особенностей этого топлива, а именно, высокой температуры горения и приверженности к детонации.

Цель работы: провести сравнительный расчет прочностных характеристик поршней двигателя ВАЗ 2105 изготовленных из алюминия марок АЛ2, АК4-1 в условиях использования их в водородном двигателе.

В качестве примера, приведём расчеты поршня двигателя ВАЗ 2105. Материал поршня – алюминий марки АЛ2. Данный сплав, наиболее подходящий в ДВС на бензине в виду его прочности, лёгкости и способности эффективного теплораспределения.

1) Плоские и близкие по конфигурации днища поршня рассчитывают на напряжения от изгиба под действием максимальных газовых сил согласно формуле

$$\sigma_и = 0{,}25 p_{z\,max}(d_в/\delta_д), \quad (1)$$

где $p_{z\ max}$ – максимальное давление газов в цилиндре двигателя (при использовании водорода – 10,64 МПа согласно [2]). $d_в$ – внутренний диаметр поршня у днища, м; $\delta_д$ – толщина днища, м. Для днища алюминиевого поршня, не имеющего ребра жёсткости, допускаемое напряжение 20-25 МПа, а при их наличии – 50-150 МПа согласно [1].

Подставив в формулу (1) необходимые данные, получим значение, равное 19,95 МПа.

2) Головка поршня рассчитывается на сжатие. Напряжение сжатия рассматривается в сечении, ослабленном отверстиями для отвода масла:

$$\sigma_c = P_{z\,max}/F_{A\text{-}A}, \quad (2)$$

где $P_{z\,max} = p_{z\ max}F_П$ – максимальная сила давления газов на днище поршня, МН; $F_{A\text{-}A}$ – площадь сечения головки поршня, ослабленного отверстиями для отвода масла, м^2.

3) Площадь сечения поршня, ослабленного масляными отверстиями:

$$F_{A\text{-}A} = \frac{\pi}{4}\left(d_K^2 - d_i^2\right) - n'_м F', \quad (3)$$

где $d_K = D - 2(t + \Delta t)$ – диаметр поршня по дну канавок, м; t – радиальная толщина кольца, м; Δt – радиальный зазор кольца в канавке поршня, м; $d_i = D - 2(s + t + \Delta t)$ – внутренний диаметр поршня, м; s – толщина головки

поршня, м; $n'_м$ – число масляных отверстий в поршне; $F' = ((d_к – d_i)/2)d_м$ – площадь продольного диаметрального сечения масляного канала, $м^2$; $d_м$ – диаметр масляного отверстия, м. Допускаемые напряжения на сжатие 30-40 МПа [1].

Подставив значения в формулу (3), получим – 0,001502 $м^2$. Затем подставим в формулу (2) и получим значение, равное 65,1 МПа. Это превышает норму примерно в 2 раза, но не предел текучести материала.

Толщина верхней межкольцевой перемычки форсированных двигателей рассчитывается на срез и изгиб от действия максимального давления газов $p_{z\ max}$. (Расчёт на разрыв опущен, т. к. изменяемые от нормальной эксплуатации значения, не участвуют в данном расчёте).

4) Сложное напряжение по третьей теории прочности:

$$\sigma_\Sigma=\sqrt{\sigma_и^2+4\tau^2}, \quad (4)$$

где $\sigma_и = 0{,}0045 p_{z\,max}(\frac{D}{h_{мп}})^2$ – напряжение изгиба межкольцевой перемычки, $\tau = 0{,}0314 p_{z\,max} D/h_{мп}$ – напряжение среза межкольцевой перемычки, где $h_{мп}$ – высота верхней межкольцевой перемычки, м.

Подставив значения в формулу (4), получим 35,3 МПа при допуске 30-40 МПа во время значительных температурных нагрузок.

При нагреве свыше 200 °С предел текучести алюминия падает на 30-50 %; исходя из этого, можно попробовать использовать кованный алюминий марки АК4–1, предел текучести которого в среднем больше на 60 %.

Сравнительное исследование было проведено в SolidWorks 2024.

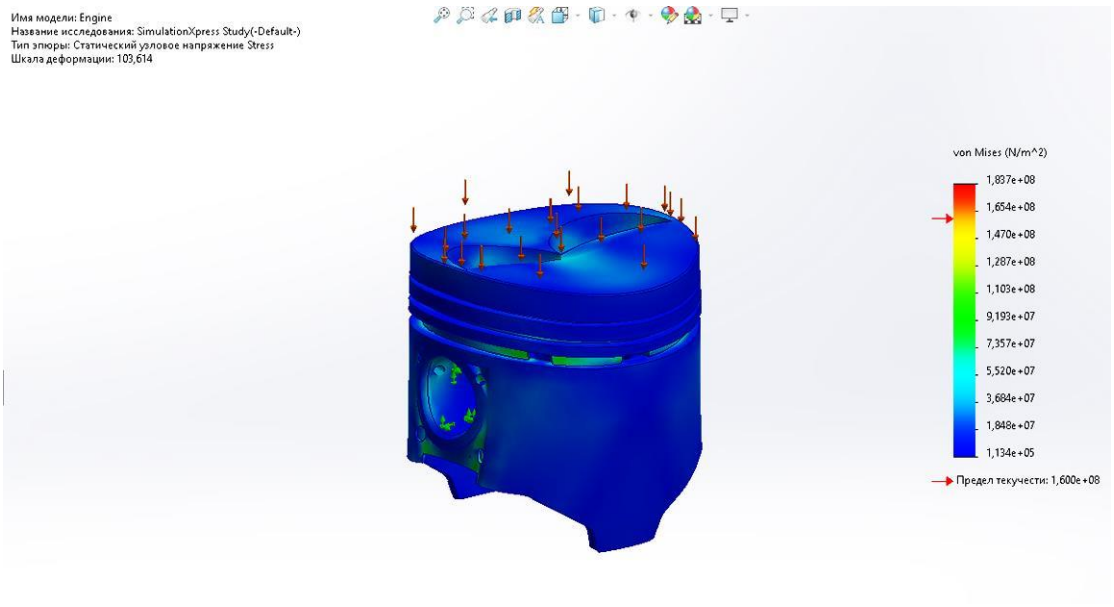


Рис. 1. Расчет НДС поршня из сплава АЛ2. Статическое напряжение по Мизесу

Симуляция в SolidWorks подтверждает предположение о теоретической возможности использования кованого сплава АК4-1 для применения в водородных ДВС в отличие от сплава АЛ2.

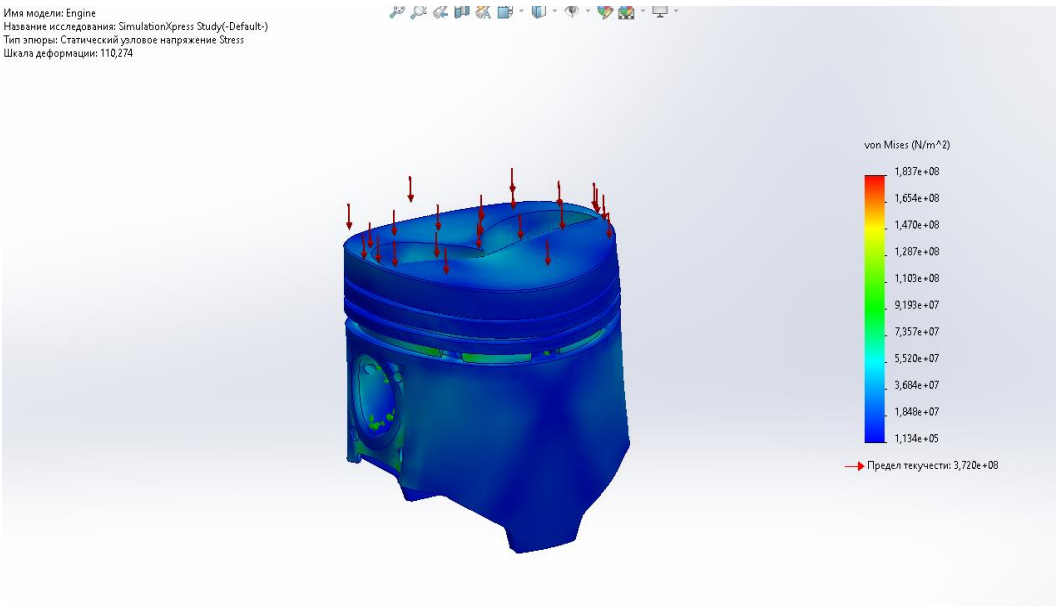


Рис. 2. Расчет НДС поршня из сплава АК4-1. Статическое напряжение по Мизесу

Выводы: 1) проведён расчет НДС поршня двигателя ВАЗ 2105 из алюминия марки АЛ2 и АК4-1 в программе SolidWorks 2024, 2) доказана возможность использования сплава АК4-1 для изготовления поршня водородного ДВС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Конструирование и расчет двигателей. URL: https://repbntuby/bitstream/handle/data/26465/Konstruirovanie_i_raschet_dvigatelejpdf (дата обращения: 30.04.2025).

2. Анализ водорода как добавки к углеводородному топливу. URL: https://moluchru/archive/363/81149/?ysclid=m8vjsg3x2872613974 (дата обращения: 30.04.2025).

АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НОЖЕЙ

П.М. Першин
Научный руководитель: д.т.н., профессор Пичхидзе С.Я.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В данной статье проведен анализ надежности и устойчивости к деформациям различных материалов, применяемых для изготовления ножей.*

Ключевые слова: *надежность, деформация*

Актуальность темы

Кухонные ножи являются неотъемлемым инструментом в повседневной жизни, от качества которых зависят удобство и эффективность приготовления пищи.

В современных условиях, когда требования к кухонной утвари постоянно растут, особое внимание уделяется долговечности, остроте и устойчивости ножей к износу. Выбор материала для изготовления ножей играет ключевую роль, так как именно он определяет их прочность, коррозионную стойкость и способность сохранять режущие свойства в течение длительного времени.

Исследование и подбор наиболее прочного материала для кухонных ножей актуальны не только для повышения качества бытовых приборов, но и для снижения затрат на их производство и эксплуатацию. Кроме того, изучение современных материалов и технологий их обработки позволяет создавать инновационные продукты, отвечающие запросам потребителей и экологическим стандартам.

Таким образом, исследование направлено на решение практической задачи – поиск оптимального материала, который сочетает в себе высокую прочность, износостойкость и доступность, что делает его востребованным как для производителей, так и для потребителей.

Цель работы: определить наиболее прочный и устойчивый к деформации материал для изготовления кухонных ножей.

Задачи: 1) проектирование моделей ножей с установкой исследуемых материалов; 2) протестировать виртуальные модели на деформацию.

Материалы: Для изготовления ножей используют различные материалы, например:

– углеродистая сталь 10 ГОСТ 1050-88. Это сплав из железа с содержанием углерода (0,1 %). Такой состав обеспечивает стали прочность и мягкость, что делает её легко поддающейся заточке. Однако углеродистые стали в чистом виде подвержены коррозии и окислению;

– дамасская сталь. Лезвие таких ножей имеет слоистую структуру. Как правило, это чередование углеродистых сталей с добавлением кобальта, молибдена и ванадия с нержавеющими сталями различной твёрдости. За счёт комбинации сталей с различными характеристиками готовый нож получается прочным, гибким и устойчивым к коррозии;

– титан Grade 5 (Ti-6Al-4V). При изготовлении титановых ножей используют заготовку из порошкового металла. Готовое лезвие получается за счёт сплавления титановой и карбидной матриц под большим давлением и температурой. В результате получаются очень лёгкие и тонкие ножи, которые долго сохраняют оригинальную заточку;

– сталь CPM S110V – высоколегированная мартенситная нержавеющая инструментальная сталь. Свойства: высокая прочность; твёрдость по шкале Роквелла 60-61; износостойкость; повышенная упругость; значи-

тельная вязкость. Используется для производства деталей и инструментов с повышенной износостойкостью и коррозионной стойкостью.

Экспериментальная часть

Для эксперимента была разработана модель ножа с длиной лезвия 100 мм, толщиной 4 мм и высотой 13 мм. К лезвию со стороны режущей кромки было приложено давление в 500 Н/мм^2. Нож был закреплён за рукоять.

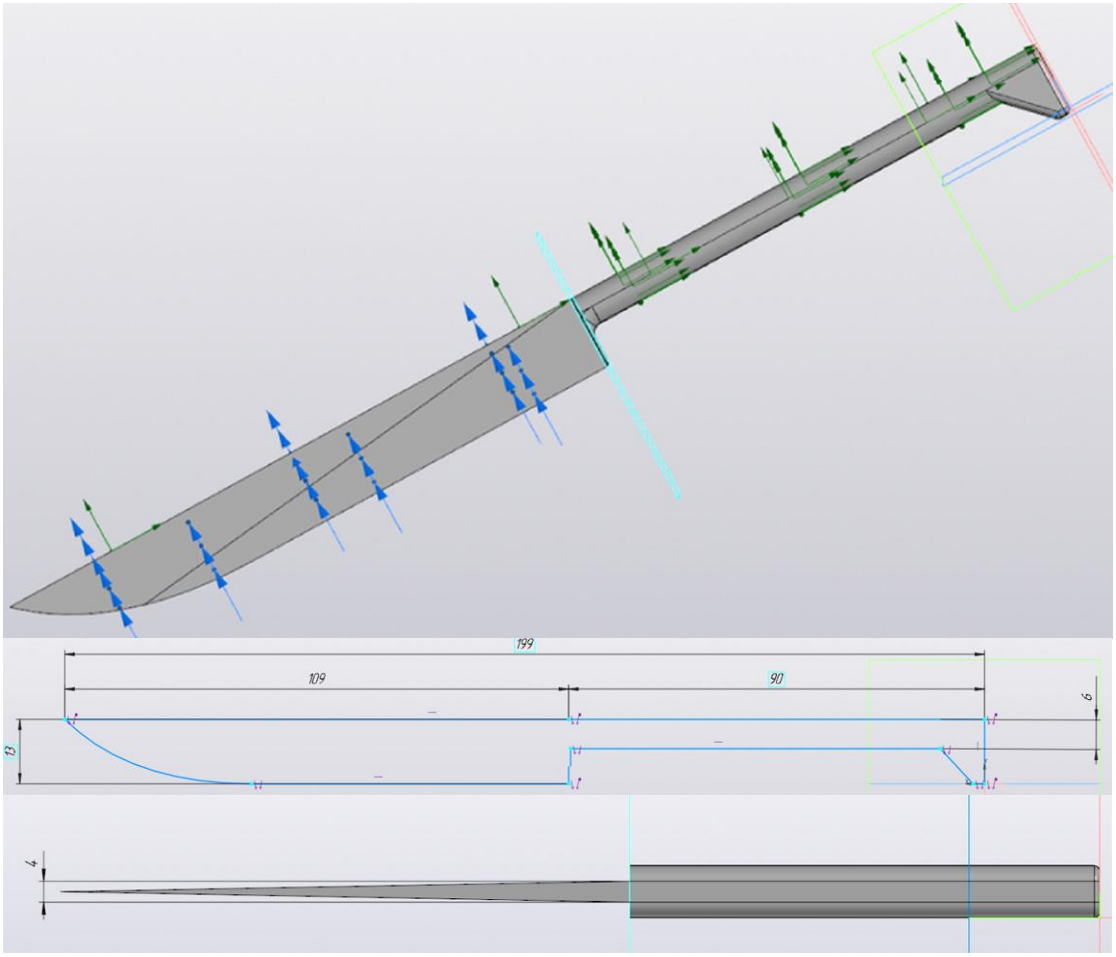


Рис. 1. Исходная модель и геометрические параметры ножа

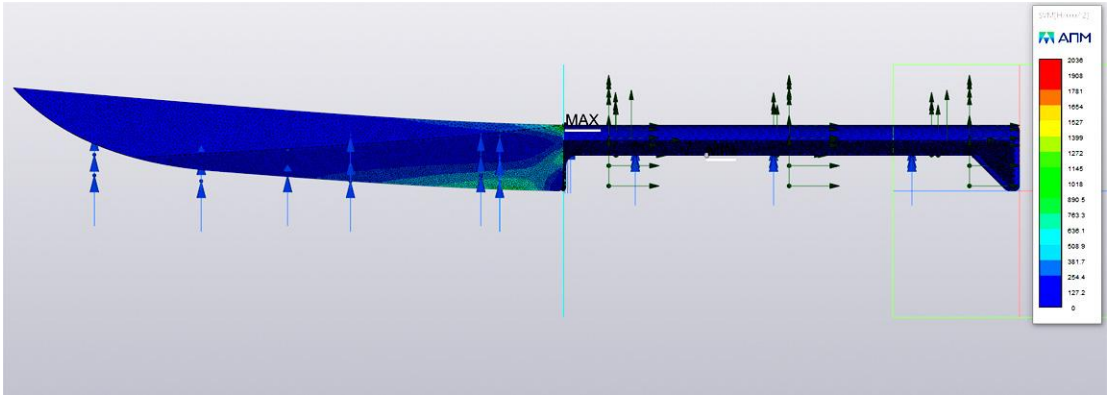


Рис. 2. Углеродистая сталь 10 ГОСТ 1050-88

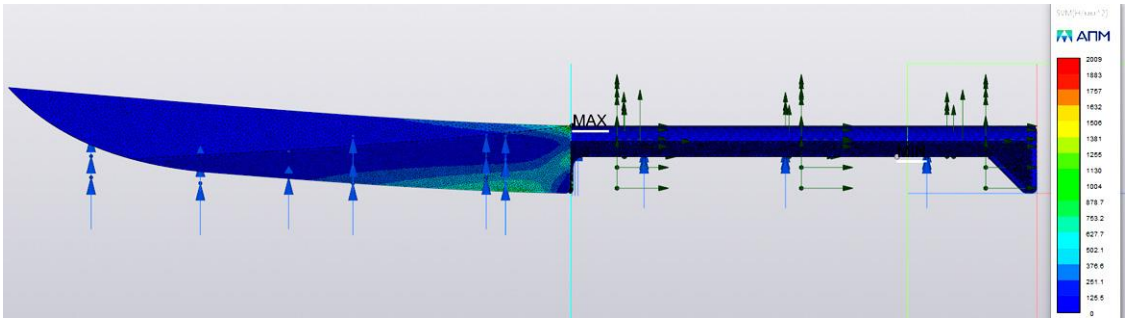


Рис. 3. Титан Grade 5 (Ti-6Al-4V)

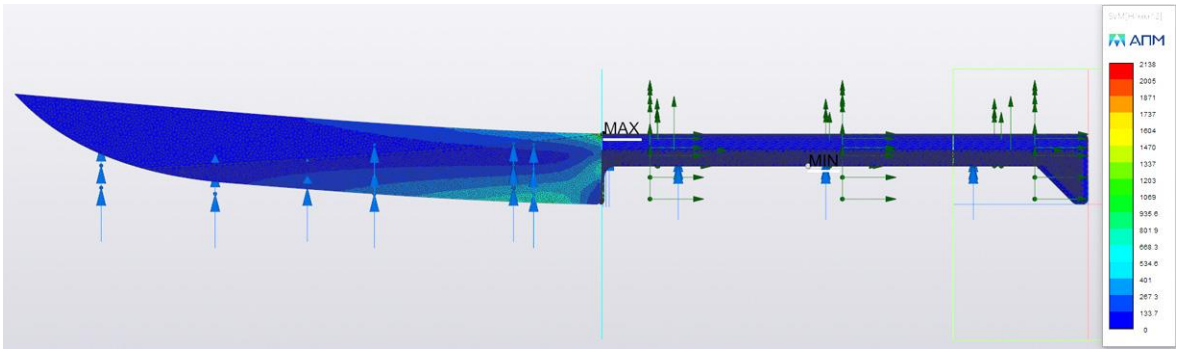


Рис. 4. Дамасская сталь

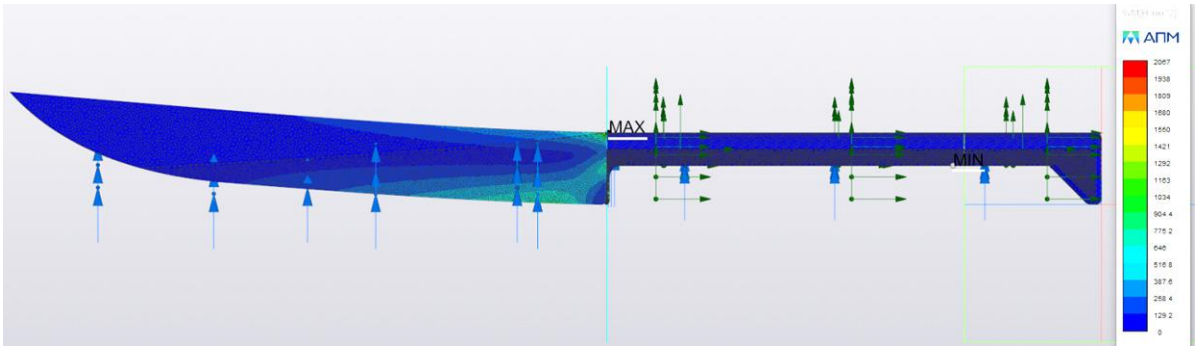


Рис. 5. Сталь CPM S110V

Выводы: в ходе моделирования и тестирования различных высококачественных и ходовых материалов, из которых изготавливают кухонные ножи, выявлено, что напряжение у титанового ножа (Grade 5 (Ti-6Al-4V)) выше, чем у других металлов. В свою очередь, самым лучшим и надёжным является нож из дамасской стали.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алифанов А.В., Милюкова А.М., Цуран В.В. Сравнительный анализ механических характеристик сталей, применяемых для изготовления рубильных ножей, получаемых методами термической и термомеханической обработок // Труды БГТУ. Литьё и металлургия. 2014. № 2. С. 74-80.

2. ГОСТ Р № 51715-2001. Декоративные и сувенирные изделия, сходные по внешнему строению с холодным или метательным оружием. Общие технические условия.

3. Лаврентьев А.Ю., Какорин Д.Д., Барчуков Д.А. Высокопроизводительный способ изготовления биметаллического дискового ножа // Глобальная энергия. 2023. Т. 29. № 3. С. 100-110. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.29307.

4. Алифанов А.В., Милюкова А.М., Цуран В.В. Разработка импортозамещающих технологий изготовления рубильных ножей и проведение их широкомасштабных испытаний // Труды БГТУ. 2015. № 2. С. 280-284. DOI: https://elib.belstu.by/handle/123456789/14883.

5. Першин П.М. Оценка надежности материалов для изготовления ножей // Научный альманах. 2025. № 5. С. 4.

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РЕЗИНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ: МЕХАНИЗМЫ ДЕГРАДАЦИИ И МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ

В.А. Миронов
Научный руководитель: д.т.н., профессор Пичхидзе С.Я.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В данной статье представлено исследование влияния ультрафиолетового (УФ) излучения на механические и физико-химические свойства резиновых изделий.*

Ключевые слова: *фотоокисление, разрыв, деградация, резина, УФ, прочность*

Введение

Резиновые материалы находят широкое применение в различных отраслях промышленности благодаря уникальному сочетанию эластичности, прочности и износостойкости. Однако при эксплуатации в условиях атмосферного воздействия, особенно под влиянием солнечного ультрафиолетового (УФ) излучения, резиновые изделия подвергаются постепенной деградации, приводящей к ухудшению их механических характеристик и сокращению срока службы.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью разработки резиновых композиций с повышенной устойчивостью к УФ-излучению, особенно для изделий, используемых в строительстве, автомо-

бильной промышленности и других областях, где длительное воздействие солнечного света неизбежно.

Цель работы: изучить влияние УФ-излучения на изменение прочностных и деформационных свойств резины, установить основные механизмы деградации и предложить эффективные методы защиты.

Теоретические аспекты УФ-деградации резин

Ультрафиолетовое излучение (длина волны 100-400 нм) обладает высокой энергией, достаточной для разрыва химических связей в полимерных материалах. Наибольшую опасность для резин представляет диапазон 290-400 нм, так как именно эти волны достигают земной поверхности и способны проникать в поверхностные слои материала.

Основные механизмы деградации

Фотоокислительная деструкция

Под действием УФ-излучения в присутствии кислорода в резине происходят радикальные реакции, приводящие к:

– разрыву углерод-углеродных связей в полимерных цепях;

– образованию гидропероксидов, кетонов и карбонильных групп;

– снижению молекулярной массы и ухудшению механических свойств.

Разрушение вулканизационной сетки

Вулканизированные резины содержат поперечные серные или пероксидные связи, обеспечивающие их эластичность. УФ-излучение способствует:

– разрыву полисульфидных связей;

– уменьшению степени сшивки, что приводит к потере прочности.

Поверхностные изменения

Длительное УФ-воздействие вызывает:

– микротрещинообразование;

– потерю гладкости поверхности;

– усиленное накопление пыли и влаги, ускоряющее дальнейшую деградацию.

Экспериментальная часть

Материалы и методы

Для исследования были отобраны образцы резин на основе:

натурального каучука (NR)

Образцы подвергались длительному воздействию ультрафиолета

3.2. Методы анализа

1. Механические испытания:

Прочность на разрыв (ГОСТ 270-75)

Относительное удлинение при разрыве

Изменение механических свойств

Анализ рис. 5, 6 свидетельствует о том, что у образца, подвергавшегося воздействию УФ, критическая область разрушения больше, чем у образца, не подвергавшегося воздействию.

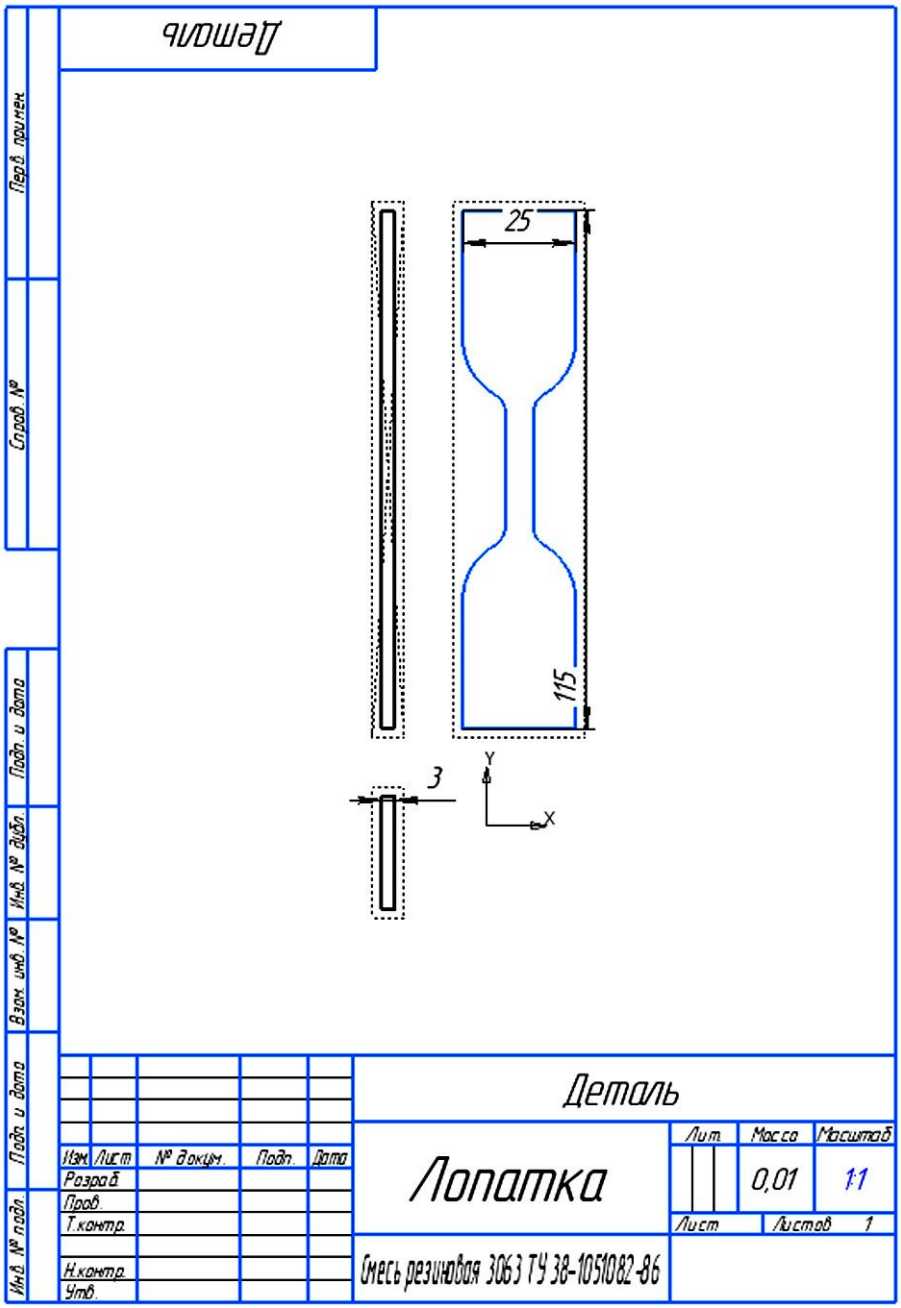


Рис. 1. Чертеж лопатки

Рис. 2. Образцы до испытаний

Рис. 3. Необлученный образец после испытаний

Рис. 4. Облученный образец после испытаний

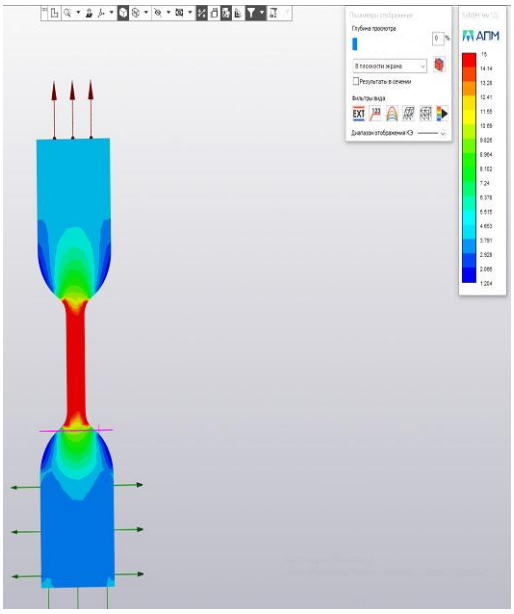


Рис. 5. Исходный образец без воздействий

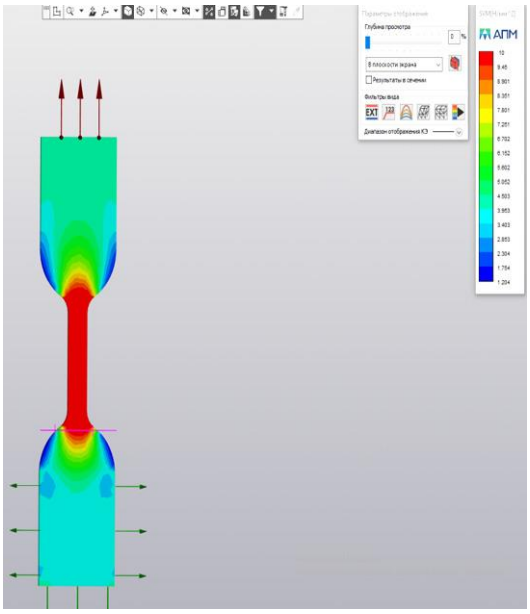


Рис. 6. Образец после УФ воздействия

Результаты испытаний

Параметр	До старения	После УФ-старения	Изменение
Прочность, Н/мм^2	15,2 ± 0,8	9,5 ± 1,2	-37 %
Удлинение, %	45 ± 2	25 ± 3	-44 %
Внешний вид	гладкая поверхность	трещины, матовость	деградация

4. Методы повышения УФ-стойкости резин

Введение стабилизаторов

УФ-абсорберы (например, производные бензотриазола)

Антиоксиданты (фенольные и аминные)

Сажа – эффективно поглощает УФ-излучение и замедляет деградацию.

Модификация состава резины
Использование EPDM вместо NR
Применение наполнителей (оксид цинка, диоксид титана)
Защитные покрытия
Полиуретановые лаки
Акриловые пленки

Заключение

1. УФ-излучение вызывает значительное ухудшение механических свойств резин за счет фотоокисления и разрушения полимерной структуры.

2. Эффективными методами защиты являются введение сажи, УФ-стабилизаторов и использование защитных покрытий.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой новых композиционных материалов на основе нанонаполнителей и гибридных стабилизаторов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Баженов С.Л. Деструкция полимеров под действием ультрафиолета. Москва: Химия, 2010. 150 с.

2. Grossman R.F. UV Stabilizers for Rubber and Plastics. CRC Press, 2018. 100 p.

3. ISO 4892-3:2016. Plastics – Methods of exposure to laboratory light sources. Part 3: Fluorescent UV lamps.

4. Mark J.E., Erman B., Eirich F.R. Science and Technology of Rubber. Academic Press, 2005. 816 p.

5. ГОСТ 270-75. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении.

6. ГОСТ 9.024-74. Единая система защиты от коррозии и старения.

АНТИГРАВИЙНАЯ БРОНЕПЛЕНКА ДЛЯ АВТОМОБИЛЯ: НАДЕЖНАЯ ЗАЩИТА И СОХРАНЕНИЕ ВНЕШНЕГО ВИДА

М.А. Купцов
Научный руководитель: д.т.н., профессор Пичхидзе С.Я.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В данной статье рассмотрена полиуретановая (антигравийная) пленка как средство защиты лакокрасочного покрытия автомобиля. Рассмотрен ее состав, причина установки, порядок установки,*

а также преимущество перед другими способами защиты ЛКП. В качестве примера приведена сравнительная характеристика образца металла с нанесенной на него пленкой и без нее после воздействия режущим инструментом.

Ключевые слова: *пленка, защита, лакокрасочное покрытие, полиуретан*

Автомобиль для многих является не только средством передвижения, но и ценным имуществом, статусным символом и предметом гордости. Поддержание его в идеальном состоянии – естественное желание каждого автовладельца. Однако агрессивное воздействие окружающей среды, мелкий дорожный мусор, гравий, ветки и даже неаккуратная парковка могут нанести ущерб лакокрасочному покрытию (ЛКП), приводя к сколам, царапинам и потёртостям. В результате чего, машина теряет свой первозданный вид и снижается её рыночная стоимость. В борьбе с этими проблемами на передовую выходит антигравийная бронеплёнка – инновационный продукт, призванный обеспечить надежную защиту ЛКП и сохранить безупречный внешний вид автомобиля на долгие годы.

Цель работы: проанализировать полиуретановую пленку с точки зрения защиты автомобильного покрытия и провести практическое исследование ее свойств.

Антигравийная бронеплёнка – это прозрачная, эластичная и самовосстанавливающаяся полиуретановая плёнка, предназначенная для нанесения на наиболее уязвимые участки кузова автомобиля. Она выступает в роли невидимого барьера, принимая на себя удары камней, царапины, следы насекомых и другие виды повреждений, защищая тем самым оригинальное ЛКП [1].

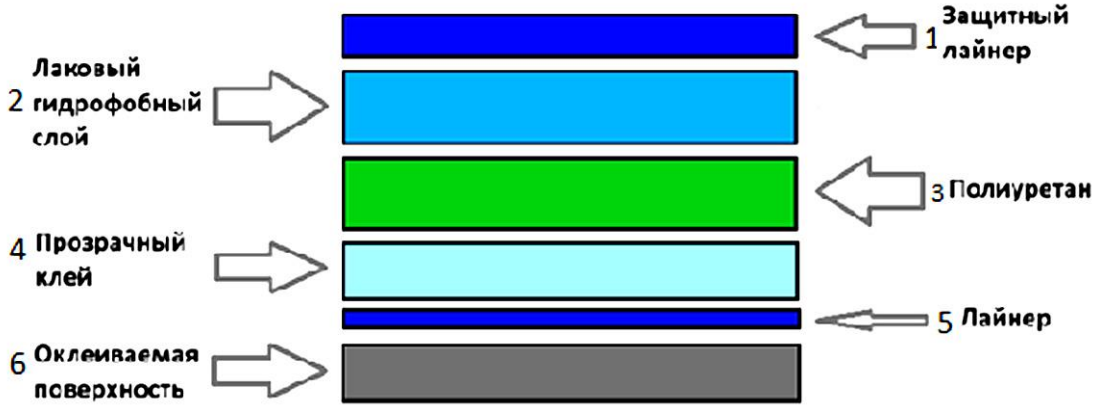


Рис. 1. Состав кузовного покрытия [2]

Зачем нужна антигравийная бронепленка? Причин для установки антигравийной плёнки на автомобиль множество, вот лишь некоторые из самых важных: 1) главная задача плёнки – это защита ЛКП от механиче-

ских повреждений. Она эффективно поглощает удары мелких камней, гравия и другого дорожного мусора, предотвращая появление сколов и царапин, которые могут стать очагами коррозии [3], 2) сохранение цвета и блеска: плёнка защищает ЛКП от выцветания под воздействием ультрафиолетовых лучей, сохраняя яркость и насыщенность цвета. Она также предотвращает помутнение лака и сохраняет блеск автомобиля, 3) защита от химических воздействий: антигравийная плёнка устойчива к воздействию химических веществ, таких как дорожная соль, реагенты, кислоты, щелочи, птичий помет и следы насекомых, которые могут повредить ЛКП, 4) самовосстановление: многие современные бронепленки обладают функцией самовосстановления. Это означает, что мелкие царапины, образующиеся на поверхности плёнки, могут самостоятельно «заживать» под воздействием тепла (например, от солнечного света или горячей воды), возвращая плёнке первозданный вид, 5) предотвращение образования ржавчины: сколы и царапины, не защищенные плёнкой, могут стать очагами коррозии, особенно в регионах с суровым климатом и обильным использованием дорожных реагентов. Антигравийная плёнка предотвращает прямой контакт металла с агрессивными веществами и влагой, тем самым защищая от ржавчины, 6) сохранение товарного вида и увеличение рыночной стоимости: автомобиль с безупречным ЛКП выглядит более привлекательно и имеет более высокую рыночную стоимость при продаже. Антигравийная плёнка помогает сохранить товарный вид автомобиля на долгие годы, что положительно сказывается на его стоимости, 7) экономия на ремонте: установка антигравийной плёнки – это инвестиция в будущее. Она позволяет избежать дорогостоящего ремонта и покраски поврежденных участков кузова, 8) простота в уходе: плёнка не требует специального ухода. Автомобиль с антигравийной плёнкой можно мыть так же, как обычный автомобиль [3].

Рис. 2. Пластинка и пленка в разрезе: 1 – защитный лайнер,
2 – лаковый гидрофобный слой, 3 – полиуретан, 4 – прозрачный клей,
5 – лайнер, 6 – оклеиваемая поверхность оцинкованного кузова

Преимущества антигравийной бронепленки перед другими способами защиты: помимо антигравийной плёнки существуют и другие способы защиты ЛКП, такие как керамические покрытия, воски и полироли. Однако антигравийная плёнка имеет ряд преимуществ перед ними: 1) более высокая степень защиты: антигравийная плёнка обеспечивает гораздо более высокую степень защиты от механических повреждений, чем керамиче-

ские покрытия, воски и полироли. Она способна поглощать удары, которые могут повредить ЛКП [3], 2) долговечность: срок службы антигравийной плёнки составляет от 5 до 10 лет, в то время как керамические покрытия, воски и полироли требуют регулярного обновления [3], 3) самовосстановление: многие современные антигравийные плёнки обладают функцией самовосстановления, которая позволяет им самостоятельно «заживлять» мелкие царапины. Керамические покрытия, воски и полироли не обладают такой функцией [3], 4) защита от химических воздействий: антигравийная плёнка обеспечивает надежную защиту от химических воздействий, в то время как керамические покрытия, воски и полироли могут быть менее устойчивы к агрессивным веществам [3], 5) простота в установке и удалении: установка и удаление антигравийной плёнки относительно просты и не требуют специальных инструментов или навыков. Керамические покрытия, воски и полироли могут потребовать более сложной процедуры нанесения и удаления [3], 6) установка антигравийной бронепленки: в ходе исследования использовалась защитная пленка марки Masak. Некоторые ее характеристики [4]:

Материал: полиуретан, размеры: 70*50*0,5 мм,

Термостойкость: до 120-130 °С

Прозрачность: высокая, светопропускаемость – 100 %

Другие характеристики: эластичная и прочная, устойчива к воздействию химических веществ, а также ультрафиолета.

В соответствии с требованием ГОСТ 31149-2014 использовались прямоугольные пластинки размером 150×100×0,5 мм, изготовленные из легированной стали марки Св12Х13 [5].

1. Подготовка поверхности: металл тщательно очищается от грязи, пыли и жира:

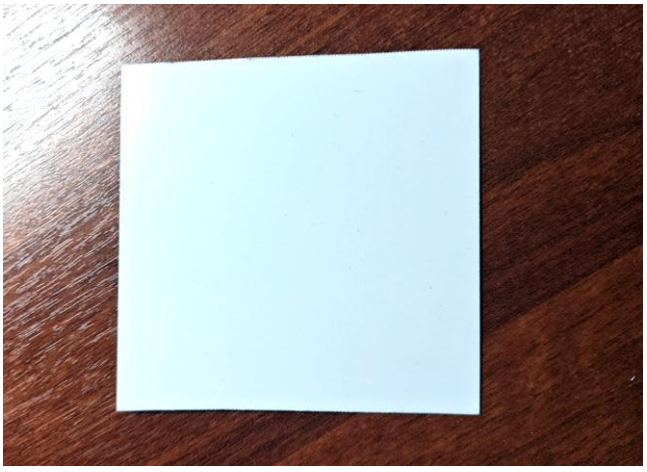


Рис. 3. Подготовка поверхности

2. Нанесение пленки: плёнка аккуратно наносится на металл, разглаживается и фиксируется:

Рис. 4. Нанесение пленки

3. Удаление пузырьков воздуха: из-под плёнки удаляются пузырьки воздуха, чтобы обеспечить плотное прилегание к поверхности:

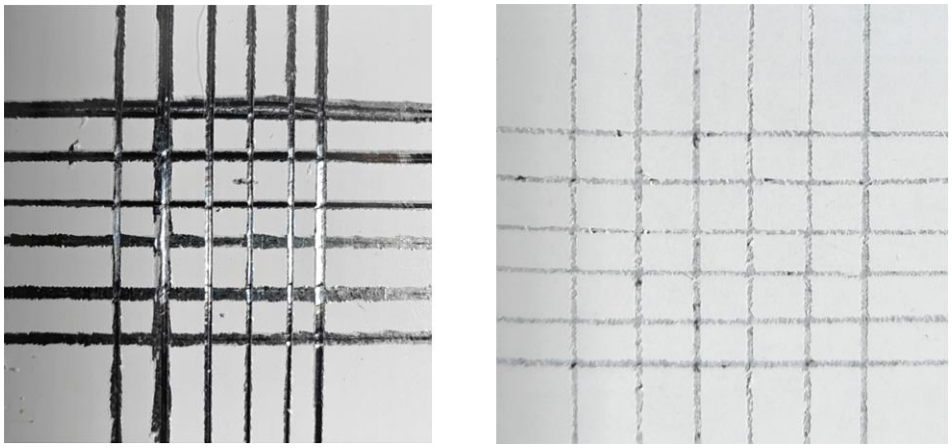
Рис. 5. Удаление лишних пузырьков и разглаживание поверхности

Шкала Мооса

Минералы	Бытовая шкала	Твердость
Тальк	Карандаш мягкий	1
Гипс	Ноготь	2
Кальцит	Медная монета	3
Флюорит	Стальная проволока	4
Апатит	Простое оконное стекло	5
Ортоклаз	Лезвие стального ножа	6
Кварц	Напильник	7
Топаз		8
Корунд		9
Алмаз		10

Используемый образец сопоставим по твердости со стальной проволокой, а значит, легко будет царапаться лезвием стального ножа, так как его твердость по шкале Мооса выше [5].

После сушки в течение 16 часов при температуре 20 ± 2 °С и влажности 30 % толщина покрытия составила 40-50 мкм. Оценка на адгезию проводилась методом решетчатых надрезов ручным способом, расстояние между надрезами 2 мм. Количество надрезов – по 6 в каждом направлении [4], рис. 6.



а б

Рис. 6. Анализ бронепленки на адгезию,
где: а – без полиуретановой пленки, б – с полиуретановой пленкой

Согласно ГОСТ 31149-2014 внешний вид поверхности надрезов рис. 6а составляет 2 балла, а на рис. 6б – 1 балл [4].

Выводы: рассмотрена полиуретановая пленка как средство защиты ЛКП автомобиля, причины ее установки, преимущество над другими способами защиты, а также практическое использование ее защитных свойств. На образце, покрытом антигравийной пленкой, царапины выражены слабо, что подчеркивает эффективность данного вида защиты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Антигравийная бронепленка. URL: https://autostudio23.ru/blog/ detail/chto-takoe-antigraviynaya-plenka/ (дата обращения: 21.05.2025).

2. Состав полиуретановой пленки. URL: https://www.ozon.ru/ product/nastoyashchaya-broneplenka-dlya-far-30h152sm-gidrofobnaya-gibridnaya-plenka-s-effektom-854389747/

3. Основные функции полиуретановой пленки. URL: https://autopr. pro/blog/okleyka-avto-poliuretanovoy-plenkoy-za-i-protiv/ (дата обращения: 21.05.2025).

4. Характеристики антигравийной бронепленки. URL: http://lkmprom.ru/clauses/materialy/poliuretanovaya-plenka/ (дата обращения: 28.05.2025).

5. ГОСТ 31149-2014. URL: https://protect.gost.ru/document1.aspx? control=31&baseC=6&page=79&month=5&year=2020&search=%D0%93%D0

%9E%D0%A1%D0%A2&id=187885&ysclid=mb2iu13iys394416110 (дата обращения: 24.05.2025).

6. Шкала Мооса. URL: https://fotoblur.ru/etalonniyy/krepiysh/po/shkale/moosa/5/bukv/ (дата обращения: 21.05.2025).

ВЫБОР СПЛАВА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОРШНЯ ДВС

Д.М. Кочегаров
Научный руководитель: д.т.н., профессор Пичхидзе С.Я.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В статье проведен анализ различных алюминиевых сплавов для изготовления поршней двигателей внутреннего сгорания.*

Ключевые слова: *поршень, алюминиевый сплав, ударная вязкость, тепловое расширение*

Активное развитие автомобильной промышленности, ориентированной на массового потребителя, обуславливает необходимость в создании новых конструкционных материалов для ДВС. Увеличение мощности и технологичности современных автомобилей требует применения материалов, способных выдерживать повышенные нагрузки. Поршень (рис. 1, 2), как наиболее ответственная деталь ДВС, непосредственно участвующая в преобразовании химической энергии в механическую, должен обладать оптимальным сочетанием свойств: высокой прочностью, термостойкостью, износостойкостью и низким коэффициентом трения при минимальном зазоре в цилиндре.

Рис. 1. Поршень [1]

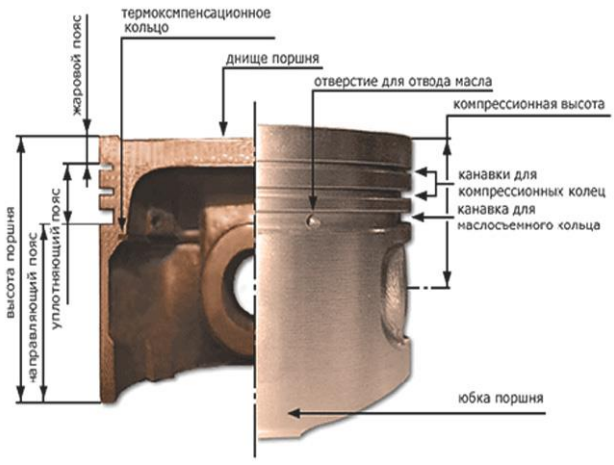


Рис. 2. Деталировка поршня [2]

Цель работы: исследование характеристик алюминиевых сплавов для определения оптимального материала для поршней двигателей внутреннего сгорания.

Исследование на ударную вязкость (ГОСТ 7213-72) [3]

Для исследования на ударную вязкость были выбраны образцы, таких материалов, как *алюминий, дюралюминий и силумин.*

Для испытания использовались следующие инструменты: кернер и слесарный молоток (рис. 3).

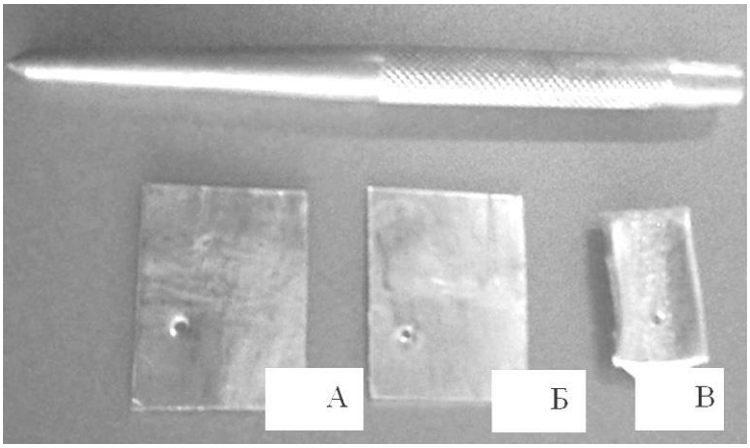


Рис. 3. Исследование образцов на ударную вязкость,
где: А – алюминий, Б – дюралюминий Д1, В – силумин АК4-1

После кернения образцы показали следующие результаты: алюминий – сквозное отверстие 3,2 мм, дюралюминий Д1 – сквозное отверстие 1,6 мм, силумин АК4-1 – вмятина 1 мм. Более устойчив к деформациям и разрушениям алюминиевый сплав – силумин АК4-1.

Исследование на тепловое расширение (ГОСТ 8.524-85) [4]

Толщину и длину образцов измерили штангенциркулем при комнатной температуре 18 °С. Затем образцы поместили в термопечь на 60 мин. при 300 °С, достав образцы, замерили их линейные размеры (рис. 4).

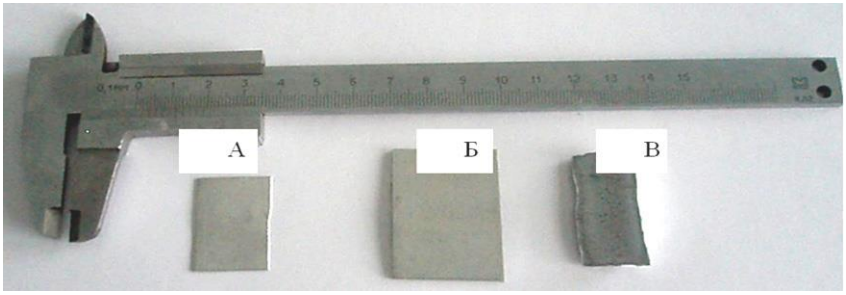


Рис. 4. Исследование образцов на тепловое расширение,
где: А – алюминий, Б – дюралюминий Д1, В – силумин АК4-1

Коэффициент линейного расширения вычисляется на основе сделанных измерений (таблица) по формуле

$$\bar{a}=\frac{\Delta L}{L_0}\times\frac{1}{\Delta T}$$

$\bar{a}$ – коэффициент линейного расширения, $°C^{-1}$;

ΔL – изменение длины образца, м;

L_0 – начальная длина образца, м;

ΔT – изменение температуры, °С.

Исходя, из линейных измерений образца, рассчитываем коэффициент линейного расширения алюминия:

$$\frac{(32,2-30,0)\times1}{30\times(300-18)}=0,00002391=23,9\times10^{-6}$$

Исходя из линейных измерений данного образца, рассчитываем коэффициент линейного расширения дюралюминия Д1:

$$\frac{(42,56-40,00)\times1}{40\times(300-18)}=0,00002262=22,6\times10^{-6}$$

Исходя из линейных измерений данного образца, рассчитываем коэффициент линейного расширения алюминиевого сплава – силумина АК4-1:

$$\frac{(37,0-35,0)\times1}{35\times(300-18)}=0,00002062=20,6\times10^{-6}$$

Измерения, сделанные для расчета коэффициента линейного расширения

Наименование материала	Линейные размеры образца, при t^0 = 18 °С, мм	Толщина образца при t^0 = 18 °С, мм	Линейные размеры образца, после нагрева и выдержке при t^0 = 300 °С, мм	Толщина образца, после нагрева и выдержке при t^0 = 300 °С, мм	Коэффициент линейного расширения, $°C^{-1}$
Алюминий	30 х 20	0,5	32,2 х 22,2	0,7	$23,9 \times 10^{-6}$
Дюралюминий Д1	40 × 30	1,2	42,56 × 32.6	1,3	$22,6 \times 10^{-6}$
Силумин АК4-1	35 × 15	5,0	37,0 × 16,8	5,5	$20,6 \times 10^{-6}$

Низкий коэффициент теплового расширения сплава силумин АК4-1 обусловливает его превосходство над другими исследуемыми материалами в интересах изготовления поршней. Данное свойство обеспечивает высокую термостабильность и минимальное изменение размеров при воздействии высоких температур, что является ключевым требованием к материалу поршня. Выбор материала для поршня был осуществлен с учетом комплекса требований, включая прочность, износостойкость, термостойкость и технологичность изготовления. Алюминий и алюминиевый сплав Д1 были исключены из списка кандидатов из-за критических недостатков: снижение усталостной прочности при высоких температурах, высокий коэффициент теплового расширения, низкая износостойкость. Ключевым ограничением является невозможность применения этих материалов при рабочей температуре 600 °С и выше. Следовательно, из трех рассматриваемых материалов (технический алюминий, алюминиевый сплав Д1 и алюминие-

вый сплав АК4-1), только алюминиевый сплав АК4-1 соответствует всем заданным критериям и требованиям к поршню.

Выводы: проведен выбор одного из трех материалов (алюминий, Д1, АК4-1) для изготовления поршня ДВС, работающего при температурах до 600°С. При этом учитывались технологичность обработки, технические характеристики, эксплуатационные свойства и экономическая целесообразность. В результате анализа всех этих факторов, для изготовления поршня выбран алюминиевый сплав АК4-1.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. https://samara.tsss.ru/upload/iblock/a80/a3rcfky5axg12t14ljymli55nn8xiv95.webp

2. https://avatars.mds.yandex.net/i?id=e99dea168847d4d26a75f9903d26cb6771b7de2f-5298414-images-thumbs&n=13

3. https://internet-law.ru/gosts/gost/37155/

4. https://internet-law.ru/gosts/gost/38971/

5. Хрулёв А. Поршень в общем и в частности // Автомир. 2010. № 2. С. 60-68.

6. Повышение качества современных поршневых сплавов / А.А. Колонаков, А.В. Кухаренко, В.Б. Деев, И.Ф. Селянин. 2008. 586 с.

7. Попова М.В. Научно-технологические основы разработки заэвтектических силуминов с регулируемым температурным коэффициентом линейного расширения // Автомир. 2004. № 1. С. 15-21.

8. Спеченные материалы из алюминиевых порошков / М.Е. Смагоринский, А.Д. Беллавин, В.Г. Гопиенко, А.А. Григорьев. Москва: Металлургия, 1993. 320 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИИ ПЛАЗМОНАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ НА ТИТАНЕ

М.С. Авдонченкова, О.А. Маркелова
Научный руководитель: д.т.н., профессор Пичхидзе С.Я.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В статье приводится методика плазменного напыления порошка карбида кремния на титан, и проводится исследование адгезии получившегося покрытия.*

Ключевые слова: *карбид кремния, титан, плазменное напыление, адгезия, эндопротезирование*

Электроплазменное напыление является достаточно эффективным способом формирования на поверхности различных деталей и узлов покрытий с широкой гаммой функциональных и эксплуатационных свойств [1].

Функциональный процесс электроплазменного напыления состоит из следующих важнейших этапов:

• генерация плазмы и формирование высокотемпературного потока газа;

• загрузка плазменного потока напыляемым порошком;

• ускорение и разогрев напыляемых порошков в плазме;

• физико-химические взаимодействия частиц, находящихся в одной из фаз с потоком, окружающей средой и подложкой материала;

• формирование напыляемого слоя необходимого качества [2].

Исходными технологическими материалами плазменного напыления являются порошки тугоплавких металлов, оксидов, твердых сплавов, композиционных материалов дисперсностью 40-315 мкм [3].

Плазменное напыление широко распространено и используется во многих сферах: в аэрокосмической промышленности для повышения долговечности лопаток турбин, в автомобильном производстве на компонентах двигателя и выхлопной системы для придания термостойкости и снижения износа, а также в медицине для нанесения покрытий на имплантаты в целях повышения их биосовместимости и улучшения их эксплуатационных характеристик [4].

Цель работы: напылить два типа покрытий из карбида кремния и провести испытания полученных покрытий на адгезию, чтобы можно было сделать вывод, какое покрытие предпочтительнее использовать.

Для исследований необходимо было получить два типа образцов: с покрытием SiC непосредственно на титановой основе и с покрытием SiC на титановом подслое. Планируется применять их на эндопротезах коленного сустава на поверхностях, контактирующих с костной тканью. Покрытия были нанесены с помощью установки плазменного напыления УПН-28 при следующих параметрах:

– ток дуги плазмотрона – 450 А (±0,05 %),

– дистанция напыления – 100 мм для SiC и 150 мм для Ti,

– дисперсность порошка SiC – 70-90 мкм,

– дисперсность порошка Ti – 150-200 мкм,

– расход плазмообразующего газа – 20 л/мин (±10 %),

– расход транспортирующего газа – 5 л/мин (±5 %).

Адгезию плазмонапыленного покрытия определяли методом сдвига на универсальной испытательной машине ИР 5082-100. Образцы склеивали напыленными поверхностями при помощи эпоксидного универсального двухкомпонентного клея марки ЭДП (рис. 1) в соотношении эпоксидной смолы к отвердителю 10:1 и оставляли под грузом до полного высыхания.

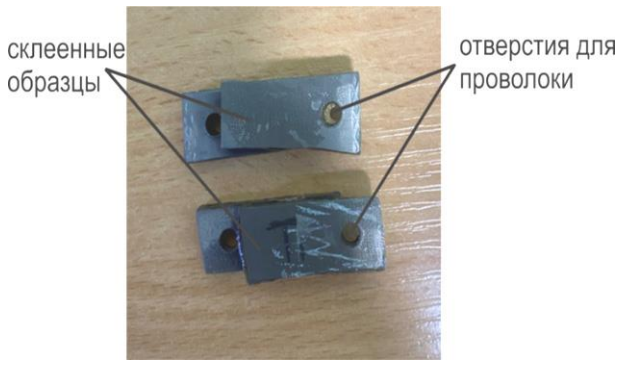


Рис. 1. Образцы, подготовленные к проведению испытаний

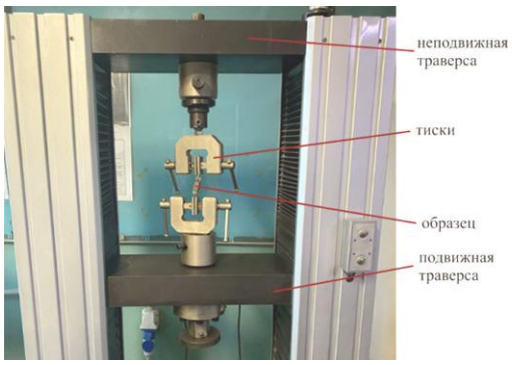
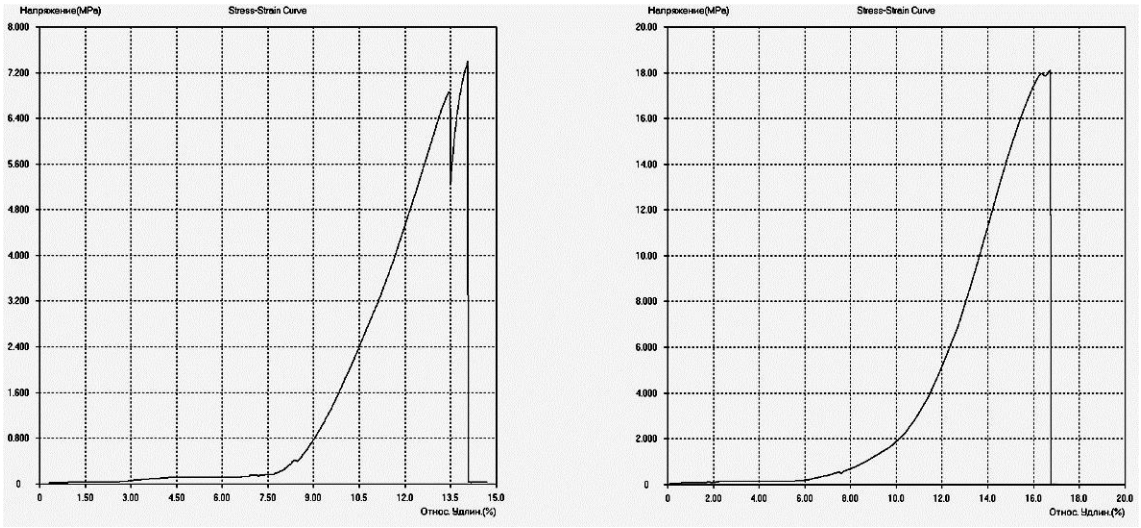


Рис. 2. Образцы в универсальной испытательной машине ИР 5082-100

Далее в отверстия с образцами продевали проволоку и закрепляли ее в тисках разрывной машины (рис. 2), после чего подвижная траверса начинала перемещаться вниз, и под нагрузкой образцы отрывались друг от друга. Прочность на отрыв для образцов с напылением SiC без титанового подслоя составила 7 МПа, в то время как для образцов с титановым подслоем она равна 18 МПа (рис. 3).



а б

Рис. 3. Графики зависимости напряжения от относительного удлинения, а – образец без титанового подслоя; б – образец с подслоем

Из представленных графиков следует, что адгезия покрытия, нанесенного на титановый подслой, в 2,5 раза выше, чем адгезия покрытия без подслоя.

Выводы: на универсальной испытательной машине ИР 5082-100 методом сдвига проведено испытание образцов с плазменным напылением карбида кремния на титановый подслой и без него. По результатам исследований выявлено, что покрытие с титановым подслоем обладает в 2,5 раза большей адгезией, чем покрытие без подслоя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лясников В.Н. Протасова Н.В. Плазменное напыление в электронике и биомедицинской технике. Саратов: СГТУ, 2010.

2. Лясников В.Н., Протасова Н.В., Дударева О.А. Свойства плазмонапыленных и гидроксиапатитовых покрытий // Вестник СГТУ. 2011. № 1 (59).

3. Виноградов А.М. Метод плазменного напыления порошковых покрытий // Проблемы науки. 2015. № 5 (35).

4. URL: https://www.keylinktech.com/ru/plasma-surface-technology/process/plasma-coating/guide-of-plasma-spray-coating/.

ЛАЗЕРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ТИТАНА КАК ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ ПЕРЕД НАНЕСЕНИЕМ БОРИДНОГО СЛОЯ

С.В. Телегин

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В статье рассматривается возможность формирования металлокерамического переходного подслоя посредством импульсной лазерной обработкой с повышенными физико-механическими свойствами перед последующим нанесением боридных слоев.*

Ключевые слова: *титан, лазерная обработка, модификация*

Современные достижения научно-технического прогресса в области создания изделий нового поколения для нужд машиностроения, приборостроения и медицины позволяют улучшать существующие материалы путем применения комбинированных технологий, как модификации поверхностных слоев, так и нанесения гетерогенных слоев на изделия [1].

Улучшение функциональных характеристик слоистого покрытия металлических материалов в большей степени будет зависеть от качественно проведенной предварительной подготовки поверхности. Широкое применение нашли методы нанесения предварительного подслоя на основной материал, который в дальнейшем служит основой для формирования покрытия. Однако при этом есть вероятность разрушения и отслоения подслоя за счет низкой адгезионной прочности [1-3].

Нами предлагается использовать лазерную модификацию титановой основы с формированием морфологически развитых металлокерамических поверхностных слоев перед последующей химико-термической обработкой, в частности борированием. При этом будет сформирован промежу-

точный подслой с высокой адгезионной прочность, что положительно скажется на физико-механических свойствах готового покрытия [4].

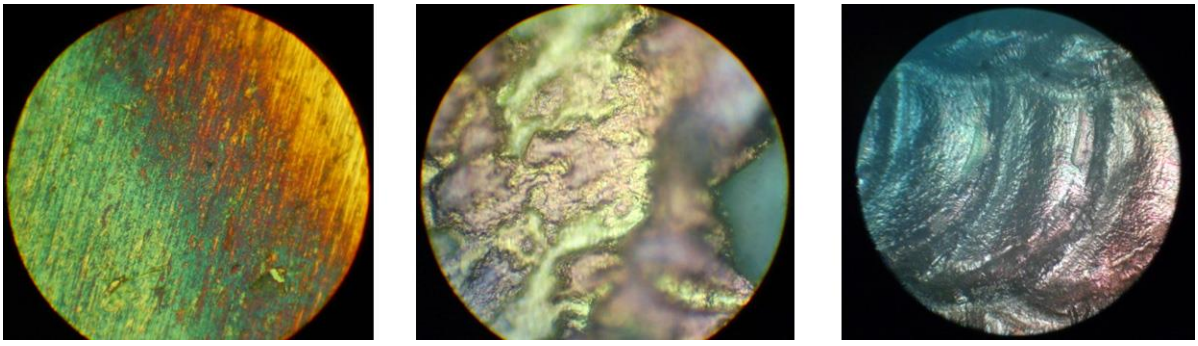
Лазерной модификации подвергались плоские образцы из технически чистого титана марки ВТ1-00 ГОСТ 19807-91 размером 15×15×3 мм. Перед модификацией поверхностных слоев производили ультразвуковую очистку и обезжиривание. После этого лазерная обработка осуществлялась в импульсном режиме на Nd:YAG-лазерном технологическом комплексе «LRS-50» с длиной волны 1,064 мкм в воздушной среде. Режимы лазерной обработки сведены в таблице. Лазерная обработка велась без оплавления и с оплавлением поверхности титана.

Технологические параметры лазерной модификации

Технологические параметры	Диапазон
1. Напряжение лампы накачки U, В	от 250 до 450
2. Длительность импульса τ, мс	от 3 до 10
3. Частота следования импульсов f, Гц	от 1 до 5
4. Число импульсов в пятне облучения, шт.	от 1 до 5

Импульсная лазерная модификация с энергией в пятне контакта менее 1×10^7 Дж/м^2 не приводит к существенному изменению физико-механических характеристик и морфологии поверхностного слоя, так как не происходит оплавления поверхности (рис. а).

Значение микротвердости увеличивается на 30 % по сравнению с исходной и достигает величины 1,8 ± 0,2 ГПа. Высокоэнергетическая модификация использующая U = 400 В, τ = 3,3 мс, N = 5 или U = 310 В, τ = 8 мс, N = 5, приводит к оплавлению поверхностных слоев титановой основы, что обеспечивает создание нужной морфологии для последующей химико-термической обработки (рис. б).



а б в

Оптическая микроскопия модифицированных образцов сформированных лазерным излучением по режимам: а) U = 300 В, τ = 8 мс, f = 1 Гц, N = 5, Q = $0{,}85\times10^7$ Дж/м^2; б) U = 400 В, τ = 8 мс, f = 2 Гц, N = 5, Q = $3{,}3\times10^7$ Дж/м^2; в) U = 450 В, τ = 8 мс, f = 1 Гц, N = 5, Q = $4{,}05\times10^7$ Дж/м^2

При лазерной модификации с плотностью энергии свыше 4×10^7 Дж/м^2 происходит разрушению сформированных покрытий вследствие образования высоких внутренних напряжений (рис. в), чем и объясняется выявленное снижение механических свойств поверхностных слоев.

Одновременно с этим формируются металлокерамические поверхностные слои с повышенными физико-механическими характеристиками. Величина микротвердости достигает 10-11 ГПа, что в 6 раз больше, чем у титана в необработанном состоянии. Дальнейшее увеличение плотности энергии лазерного излучения приводит к снижению величины микротвердости, так как в поверхностном слое начинают образовываться трещины (рис. в).

Анализ результатов профилометрии экспериментальных образцов установил возможность управлять основными параметрами шероховатости сформированных лазерной модификацией поверхностных слоев титановой основы в широкой диапазоне значений: R_a от 0,10 до 3,95 мкм, R_z от 0,46 до 21,2 мкм, R_{max} от 0,52 до 29,01 мкм и S_m от 8,5 до 91 мкм. Что позволит при дальнейших исследованиях определить оптимальные параметры шероховатости для последующего борирования металлокерамических поверхностных слоев с повышенными функциональными характеристиками.

Обобщая выше изложенное, можно сделать вывод, что изменяя параметры лазерной модификации, существует возможность формировать требуемую морфологию и повышенные физико-механические свойства поверхностных слоев перед последующей химико-термической обработкой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Новые материалы и технологии существенного повышения износостойкости рабочей поверхности металлургического оборудования / А.Б. Котельников, А.А. Вопнерук, А.В. Макаров и др. // Тяжелое машиностроение. 2018. № 9. С. 14-20.

2. Хаскин В.Ю. Процессы упрочнения и нанесения покрытий с использованием лазерного излучения: (обзор) // Автомат. Сварка. 2008. № 12. С. 24-32.

3. Технология обработки поверхности изделий технического и медицинского назначения высокоэнергетическими потоками для восстановления их геометрических размеров и увеличения срока эксплуатации / Ю.Р. Колобов, О.А. Кашин, Ю.П. Шаркеев, Б.П. Гриценко, Е.В. Найденкин // Технология машиностроения. 2006. № (4). С. 39-44.

4. Телегин С.В., Гоц И.Ю. Влияние режимов лазерного излучения инфракрасного диапазона на формирование композиционных поверхностных слоев титановых изделий // Вопросы электротехнологии. 2022. Вып. № 3 (36). № 3 (36). С. 22-31.

АНАЛИЗ ПЛАЗМОНАПЫЛЕННОГО БИОГЕННОГО TI,CA-ГИДРОКСИАПАТИТА

М.Х. Моавад, М.А. Викулова, И.В. Зотов, О.А. Маркелова,
Костин К.Б., Пичхидзе С.Я.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В данной статье проведен анализ ПН биогенного Ti,Ca-ГА и подтверждена структура. Исследована адгезия ПН биогенного Ti,Ca-ГА и определены его пористость, зернистость, размер частиц.*

Ключевые слова: *биогенногоTi, Ca-ГА, плазменное напыление*

Известно, что в ортопедии широко используются различные изделия [1-3], внедряемые в костную ткань, а именно: эндопротезы, зубные имплантаты, ортопедические конструкции [4-6]. Кроме титана и его сплавов, при изготовлении имплантатов используются медицинские стали. Для формирования биосовместимой композитной поверхностно-пористой структуры используется плазменное напыление (ПН).

Покрытия, полученные методом ПН, характеризуются достаточно высокой (более 50 %) пористостью, удовлетворительной адгезией, неоднородностью поверхности [7-10]. При ПН и охлаждении улучшаются трибологические свойства покрытий, прочность сцепления, повышается твердость, изменяется размер зерна, проходят реакции окисления, разложения [11].

Для устранения недостатков по отслаиванию или растрескиванию ПН – покрытий, обычно модифицируют напыляемый порошок.

Цель работы: анализ плазмонапыленного биогенного *(Ti,Ca)-ГА* покрытия на нихроме.

1. Материалы и методы

1.1. Подготовка покрытий

В исследованиях использовались образцы нихрома Х20Н80 ГОСТ 12766.1-90 и ТУ 14-1-3224-81 размером 10*10*2 мм (Cr – 20-23 %, Si – 0,9-1,5 %, Mn до 0,7 %, Fe до 1,5 %, основа – Ni). Перед нанесением покрытия подложки подвергались абразивно-струйной обработке порошком электрокорунда с размером частиц 200-250 мкм при давлении 4-4,5 МПа. Образцы очищались от технологических загрязнений в водном 96 % растворе этанола в течение 5 мин с использованием УЗ – ванны. Затем образцы высушивали на воздухе.

ПН пористые покрытия сформированы с использованием Ti – порошка марки «ПТС-1» по ТУ 14-22-57-92 с использованием автоматической установки УПН-28 «RemPlasma».

Параметры и условия получения покрытий методом ПН

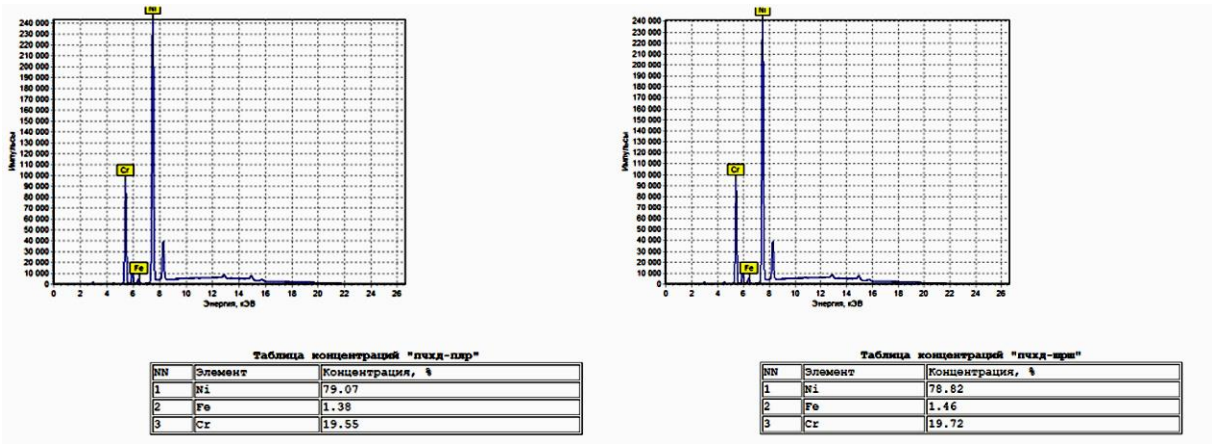
Параметр	Значение
Дисперсия порошка, мкм	40-90
Ток дуги плазмотрона, А	350 ± 5
Напряжение, В	35 ± 0,5
Расстояние распыления, мм	100 ± 20
Расход плазменного газа (аргона), л/мин	20-25
Расход транспортного газа (аргона), л/мин	5-7
Продолжительность распыления (для 1 образца, S = 100-150 мм^2), с	20-25
Окружающая атмосфера в распылительной камере	Воздух+Ar

Затем для последующего ПН использовался *био*-(*Ti,Ca*)-*ГА* [12,13]:

$$Ca10(PO4)6(OH)2 + x/2Ti4+ \rightarrow$$
$$(Ca10\text{-}xTix/2)(P04)6(OH)2 + xCa2+ + x/2\ VCa2+$$

где V_{Ca}^{2+} – вакансия.

1.2. Результаты исследований. ЭДРА исследуемых образцов Х20Н80 приведен на рис. 1. В основном видно присутствие Cr, Fe и Ni [14].



а б

Рис. 1. ЭДРА пластинок Х20Н80, где: а – исходная, б – отпескоструенная

Результаты последовательного ПН Ti и $(Ca_{10}\text{-}_xTi_{x/2})(P0_4)_6(OH)_2$ представлены на рис. 2. Рефлексы от хрома должны быть при углах более 90°.

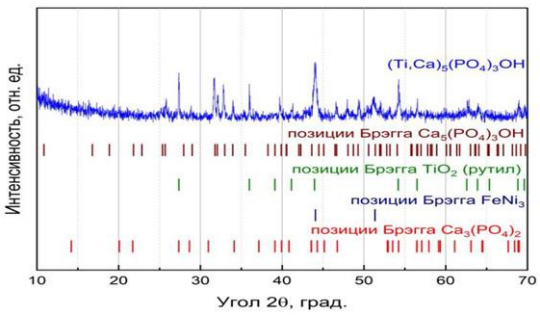


Рис. 2. РФА ПН образца био-ГА (Ca,Ti)

Близкие ионные радиусы Ti^{2+} в титанил-ионе TiO^{2+} 1,36 A^o и Ca^{2+} 1,33 A^o в тройной связи соединения $Ca_3(PO_4)_2$, как основного элемента структуры ГА, предполагают сохранение объема элементарной ячейки для катион-замещенного ГА при данной степени замещения. Внедрение титана Ti^{4+}, r = 0,68 A^o, вероятно, вообще не затруднено. Поэтому наблюдаются достаточно близкие рефлексы на дифрактограммах при замещении Ca^{2+} на Ti^{4+}. Анализ рис. 3 свидетельствует на многомерность нанесенного покрытия, при этом адгезия составила примерно 15 МПа.

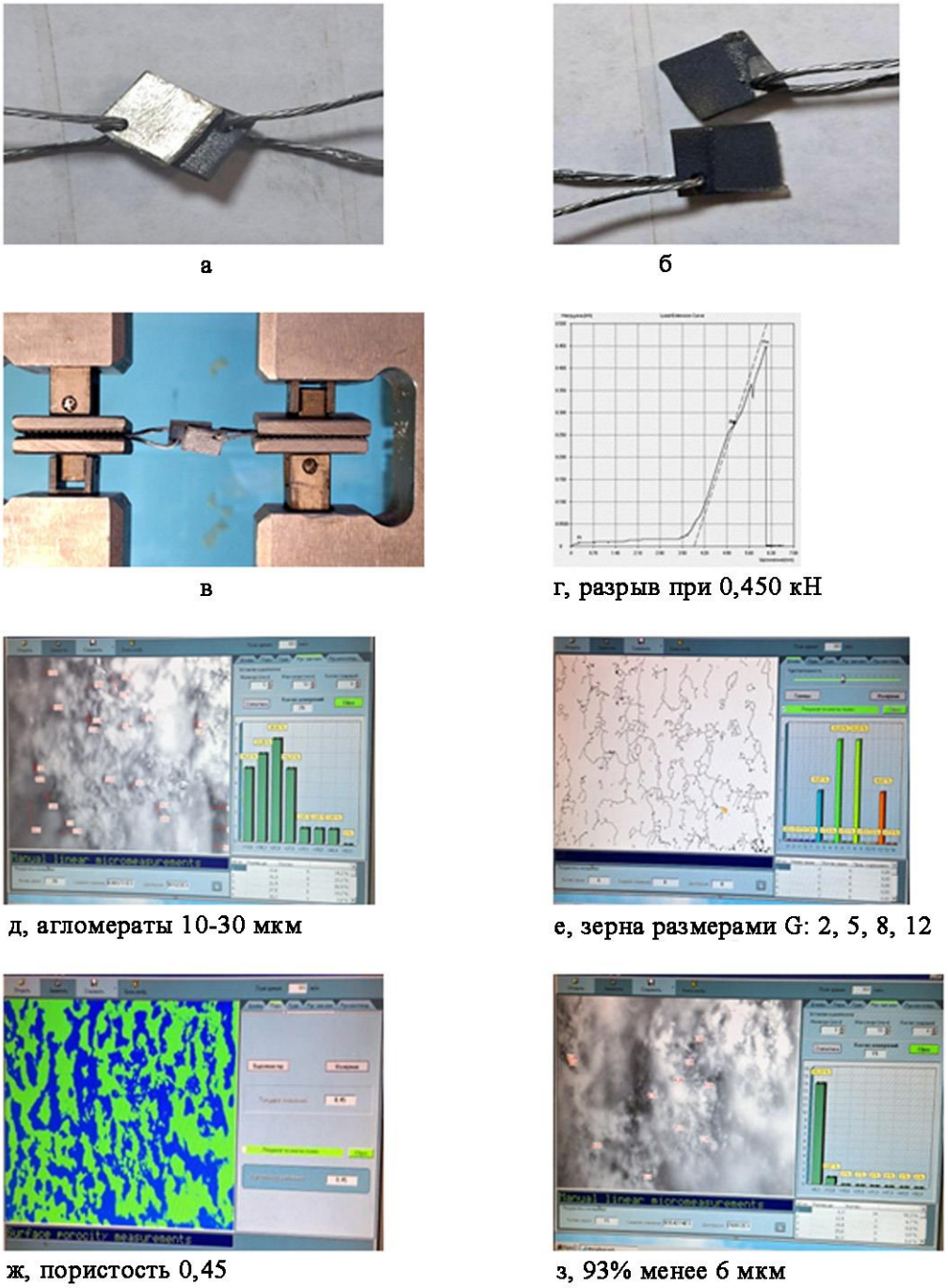
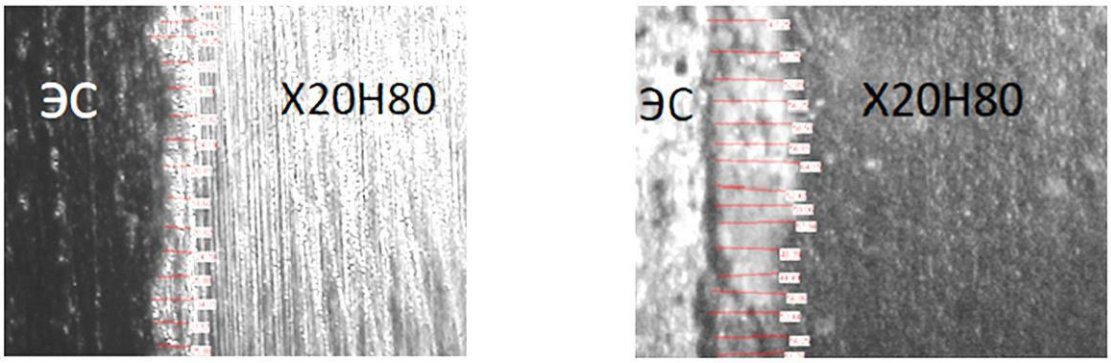


Рис. 3. Свойства ПН покрытия, где: а-г – разрыв склеенных образцов, д- з – основные размеры частиц, агломератов, зерен и пористость

Определение номера зерна от различных параметров проведено по ГОСТ ISO 643-215. Показано, что 66 % всех зерен относятся к номерам зерен 5 и 8 размеров 62 и 22 мкм. Присутствуют поры и отдельные частицы менее 6 мкм, при ПН имеет место оплавление частиц и образование агломератов. Анализ залитого в эпоксидной смоле шлифа показал наличие достаточно равномерного покрытия (рис. 4).



а, ширина кадра 360 мкм б, ширина кадра 360 мкм

Рис. 4. Шлиф в эпоксидной смоле, а – до травления, б – после травления водным раствором $FeCl_3$, покрытие: среднее 54,5 мкм, n = 17

Выводы: проведен анализ плазмонапыленного биогенного *(Ti,Ca)-ГА* покрытия на нихроме. Показано образование достаточно прочного пористого покрытия адгезией примерно 15 МПа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Pohler O.E.M. Unalloyed titanium for implants in bone surgery, Injury 31 (4) (2000) D7–D13, https://doi.org/10.1016/S0020-1383(00)80016-9.

2. Elias C.N., Lima J.H.C., Valiev R., Meyers M.A. Biomedical applications of titanium and its alloys, JOM (J. Occup. Med.) 60 (2008) 46-49, https://doi.org/10.1007/s11837-008-0031-1.

3. Niinomi M., Mechanical biocompatibilities of titanium alloys for biomedical applications, J. Mech. Behav. Biomed. Mater. 1 (1) (2008) 30-42, https://doi.org/ 10.1016/j.jmbbm.2007.07.001.

4. Pachimalla P.R., Mishra S.K., Chowdhary R. Evaluation of hydrophilic gel made from Acemannan and Moringa oleifera in enhancing osseointegration of dental implants. A preliminary study in rabbits, J. Oral Biol. Craniofacial Res. 10 (2) (2020) 13-19, https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2020.01.005.

5. Geetha M., Singh A.K., Asokamani R., Gogia A.K. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants – a review // Prog. Mater. Sci. 54 (3) (2009) 397-425, https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.06.004.

6. Long M., Rack H.J. Titanium alloys in total joint replacement – a materials science perspective, Biomaterials 19 (18) (1998) 1621-1639, https://doi.org/10.1016/ S0142-9612(97)00146-4.

7. Vardelle A., Moreau C., Themelis N.J., Chazelas C.A. A perspective on plasma spray technology, Plasma Chem. Plasma Process. 35 (2015) 491-509, https://doi. org/10.1007/s11090-014-9600-y.

8. Benea M.L., Benea L.P. Characterisation of the TiO2 coatings deposited by plasma spraying, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 106 (2016), 012024, https://doi.org/10.1088/1757-899X/106/1/012024.

9. Odhiambo J.G., Li W., Zhao Y., Li C. Porosity and its significance in plasmasprayed coatings, Coatings 9 (7) (2019) 460, https://doi.org/10.3390/ coatings9070460.

10. Kalita V.I., Mamaev A.I., Mamaeva V.A., Malanin D.A., Komlev D.I., Gnedovets A.G., Novochadov V.V., Komlev V.S., Radyuk A.A. Structure and shear strength of implants with plasma coatings, Inorg. Mater. Appl. Res. 7 (3) (2016). 376-387, https://doi.org/10.1134/S2075113316030102.

11. Sasaki S. Tribological properties of coating films synthesised by laser assisted plasma spraying, Surf. Eng. 13 (3) (1997) 238-242, https://doi.org/ 10.1179/ sur.1997.13.3.238.

12. Викулова М.А., Шигаев М.Ю., Мохамед Ахмед Мохамед Али, Костин К.Б., Пивоваров А.В., Пичхидзе С.Я. Влияние замещения кальция на титан на фазообразование и структуру био-гидроксиапатита // Научный альманах. 2025. № 3-3 (125), с. 9-15. URL: https://ukonf.com/doc/na. 2025.03.03.pdf.

13. Викулова М.А., Пивоваров А.В., Пичхидзе С.Я. Замещение кальция на титан в био-гидроксиапатите // Актуальные проблемы и пути развития энергетики, техники и технологий: XI Международная научно-практическая конференция / БИТИ НИЯУ МИФИ. Балаково, 2025. – 7 с. URL: https://biti.mephi.ru/science.

14. Короткий И.В. Новый шовный материал – нихромовая проволочная нить при грыжесечении: дис....канд. мед. наук. Москва, 1988. – 215 с.

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БИОСОВМЕСТИМОГО КОМБИНИРОВАННОГО ПОКРЫТИЯ ВНУТРИКОСТНЫХ ЭНДОПРОТЕЗОВ

Л.Э. Курмышова, О.А. Маркелова, С.Я. Пичхидзе
Научный руководитель: к.т.н. Маркелова О.А.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *Предложена комбинированная технология получения биосовместимого покрытия на титановой основе, включающая плазменное напыление порошка гидроксиапатита и последующую ультразвуковую пропитку суспензией порошка оксида магния. Полученное покрытие*

сформировано частицами размером 20-50 мкм с агломератами размером 90 мкм и более, адгезионная прочность покрытия составила 12 МПа.

Ключевые слова: *плазменное напыление, гидроксиапатит, оксид магния, покрытие*

В современной ортопедической хирургии широко применяется эндопротезирование тазобедренного и коленного суставов. Такая операция является сложной, предполагает значительное вмешательство в организм и сопряжена с большим риском появления как общих, так и местных осложнений. Одной из основных проблем, связанных с проведением эндопротезирования крупных суставов, является повышенный риск появления инфекционных осложнений. На современном этапе имплантаты изготавливаются из коррозионностойких материалов, но ввиду постоянного контакта с биологически активными средами организма, свойства металла могут изменяться. Этот риск уменьшается при использовании биосовместимых покрытий на поверхности эндопротезов. Кроме того, биосовместимые материалы способны помочь сократить срок реабилитации пациента и снизить риск развития послеоперационных осложнений [1].

Исследуемое в рамках данной работы покрытие характеризуется выраженным антимикробным эффектом, а также может выполнять защитную функцию для металлических конструктивных элементов эндопротезов. Основу покрытия составляют гидроксиапатит ($Ca_5(PO_4)_3OH$) и оксид магния (MgO). Они снижают риск развития гнойных воспалений и отторжения имплантата в послеоперационный период, ускоряют срок приживаемости эндопротезов в два раза, MgO повышает механическую прочность, улучшает приживаемость и биосовместимость синтетического гидроксиапатита [2, 3].

Образцы изготавливали из титановой пластины марки ВТ6. Далее образцы подвергались абразивно-струйной обработке на установке «Чайка-20» порошком электрокорунда по ГОСТ 28818-90 фракцией 0,5-1,3 мм в течение 2 минут.

После придания поверхности необходимой шероховатости, образцы очищали и обезжиривали с использованием ультразвуковой ванны «УЗУМИ-2». Параметры, при которых происходит ультразвуковая очистка, приведены в таблице.

Параметры ультразвуковой очистки

Раствор для обработки	Частота ультразвука, кГц	Время обработки, с	Температура раствора, °С
Моющий раствор	20±2	600	25

После завершения очистки образцы промывали и сушили естественным способом. Напыление порошкового материала на образцы осуществ-

ляли на установке УПН28, которая используется для получения покрытий из керамических и металлических материалов.

Плазменное покрытие порошком гидроксиапатита (ГА) формировали по следующим технологическим режимам: ток дуги плазмотрона – 350±5 А, дистанция напыления – 50±5 мм, продолжительность напыления – 10-15 с.

Предварительно порошок ГА измельчали в ступке и просеивали ситом дисперсностью 90 мкм (рис. 1, 2).

Рис. 1. Измельчение порошка ГА с использованием ступки

Рис. 2. Просеянный порошок ГА

Полученные образцы с покрытием (рис. 3) изучали с использованием анализатора изображения микроструктур АГПМ-6М, полученные результаты обрабатывались с использованием программы «Металлограф».

Рис. 3. Образцы после напыления порошка ГА

Установлено, что размер образований на поверхности образцов варьируется от 20 до 50 мкм.

Комбинированное покрытие получали путем пропитки напыленных образцов суспензией MgO при воздействии ультразвуковых колебаний. Порошок MgO разводили дистиллированной водой до получения 20 % раствора и пропитывали в полученной суспензии в течение 10 минут (рис. 4). Далее образцы высушивались при комнатной температуре до полного испарения жидкости (рис. 5).

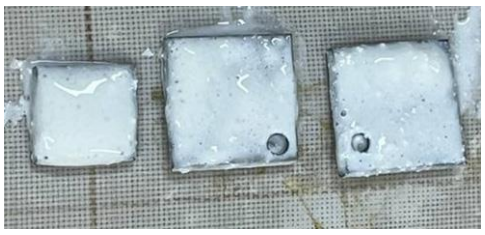


Рис. 4. Образцы
после пропитки раствором MgO

Рис. 5. Образцы
после пропитки и сушки

Микроструктура поверхности после пропитки изучалась с использованием АГПМ-6М (рис. 6) и МИМ-7 (рис. 7).

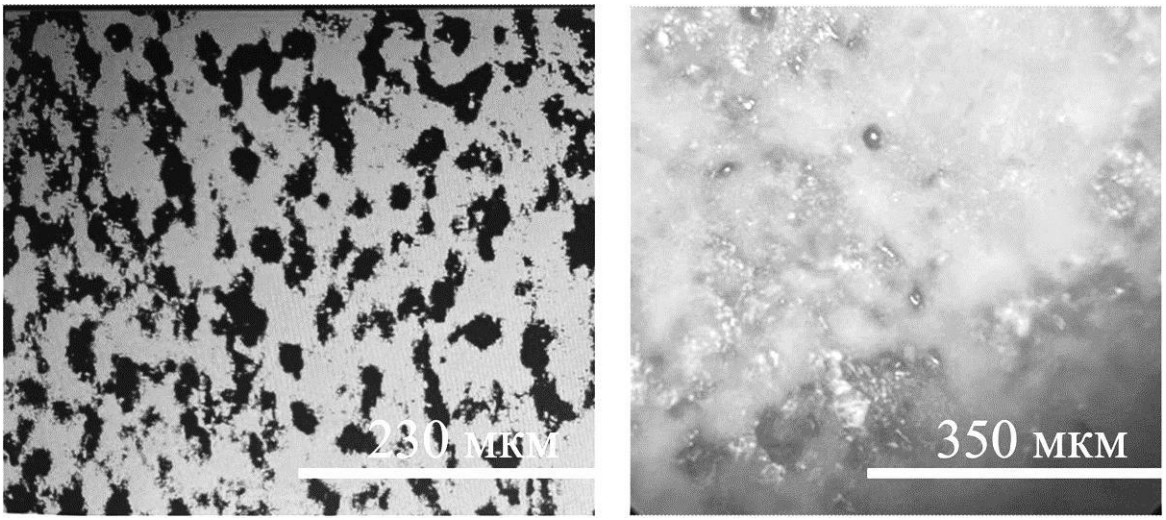


Рис. 6. Микроструктура поверхности покрытия образцов ГА
после пропитки порошком MgO

Размер образований частиц, зафиксированных на поверхности образцов, составлял 20-50 мкм, образующих агломераты размером 90 мкм и более. Адгезию покрытия изучали с использованием универсальной испытательной машины ИР 5082-100 (рис. 7). Расчетная адгезионная прочность покрытия составила 12 МПа.

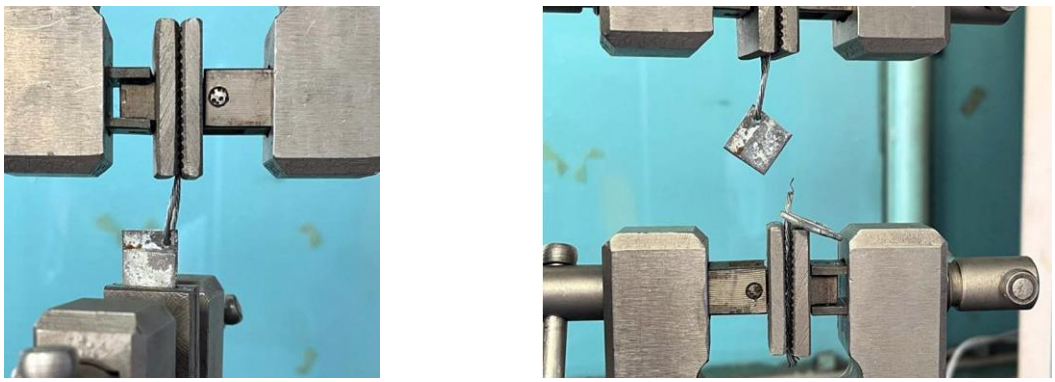


Рис. 7. Образцы до (а) и после (б) испытания на адгезионную прочность

Таким образом, успешно реализована пропитка пористого ГА покрытия оксидом магния с использованием разработанной методики, обеспечивающей попадание порошка MgO в поры покрытия. Покрытие сформировано частицами размером 20-50 мкм, которые образуют агломераты размером 90 мкм и более, адгезионная прочность покрытия составила 12 МПа. Пропитка MgO потенциально может несколько увеличивать растворимость ГА, что будет способствовать ускоренному формированию костной ткани на поверхности эндопротеза.

В целом результаты проведенной работы подтверждают перспективность использования MgO для модификации гидроксиапатитных покрытий эндопротезов и открывают новые возможности для создания более долговечных и биосовместимых имплантатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ежов Ю.И., Ежов И.Ю., Петрушов К.Н., Корыткин А.А., Загреков В.И. Эндопротезирование суставов как метод эффективной высокотехнологичной медицинской помощи // Медицинский альманах. 2010. № 3. С. 174-176.

2. Мацакова Е.Г., Симакова Д.И. Наночастицы, проявляющие антибактериальные эффекты: свойства, получение, механизм действия, применение // Российские нанотехнологии. 2020. Т. 15. № 2. С. 238-243.

3. Осадченко И.М., Лябин М.П., Романовскова А.Д. Оксид магния: свойства, методы получения и применения (аналитический обзор) // Природные системы и ресурсы. 2018. Т. 8. № 3. С. 5-14.

ЗАМЕЩЕНИЕ КАЛЬЦИЯ НА ТИТАН В БИО-ГИДРОКСИАПАТИТЕ

О.А. Маркелова, М.А. Викулова, С.Я. Пичхидзе

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В данной статье проведен синтез и подтверждена структура биогенного Ti,Ca-ГА. Исследовано влияние замещения катиона Ca на Ti для концентрации 15-16 ат. % на формирование гидроксиапатита (ГА). При введении катиона Ti основной образующейся фазой является био-ГА.*

Ключевые слова: *био-ГА, синтез*

Известно [1, 2], что важной задачей науки является разработка эффективных методов контроля загрязнений окружающей среды. Катализа-

тор TiO2 проявляет хорошую активность в фотоокислении органических соединений при использовании кислорода и жидких окислителей. Однако при практическом применении возникают некоторые трудности, такие как фильтрация тонкодисперсного TiO2 или фиксация частиц катализатора и эффективное использование УФ-лучей.

Известно несколько попыток повысить его фотоэффективность путем осаждения благородных металлов [3] и ионного легирования [4-5]. Другой способ повысить фотокаталитическую эффективность титана заключается в добавлении соадсорбентов, например: диоксида кремния, оксида алюминия, цеолитов, активированного угля, глины [6-9].

Однако требовалось значительное улучшение фотоэффективности при УФ и видимом облучении известен не только как основной компонент биологических твердых тканей, но также как адсорбент и катализатор [10-12].

Поверхностные ОН-группы адсорбируют CO2, NOx, H2O, органические соединения и обладают высоким сродством к биоматериалам и красителям. Обнаружено, что окислительное разложение соединений, таких как метилмеркаптан (ММ) и диметилсульфид (DMS), эффективно происходило на ГА при УФ (254 нм) облучении [13-16]. Также найдено [17], что ГА, обработанный Ag+, имел структуру (Ag,Ca)10(PO4)6(OH)2, обладающую антимикробным эффектом.

В работах [18-21] показано, что модифицированный Ti4 + ГА в отличие от TiO2, проявляет более высокий бактерицидный эффект и разлагает ацетальдегид, в темноте и при воздействии УФ-излучения. Предложен метод синтеза (Ti,Ca)10(PO4)6(OH)2, обладающего фотокаталитическими свойствами [22, 23].

Цель работы заключалась в получении и идентификации биогенного (Ti,Ca)-ГА.

Материалы и методы. Исходными материалами были реагенты: био-ГА и TiCl4. Использовался био-ГА, регистрационный сертификат REACH № 2019/02/22 / 01-01, код CAS № 12167-74-7), изготовленный из бычьих костей по патенту РФ № 2642634 «Способ переработки костей для получения гидроксиапатита». Кристаллографическая структура био-ГА соответствовала структуре Ca5(PO4)3(OH) согласно файлу порошковой дифракции PDF 9-432 Международного центра дифракционных данных ICDD, № 010-74-7080; № 010-79-8093 Ca10(PO4)6(OH)2. Допускается содержание карбонатных групп CO32- и микроэлементов, входящих в состав костного сырья.

К суспензии био-ГА в i-C3H7OH или в CCl4 добавляли TiCl4 (CAS №7550-45-0, ТУ 1715-001-50267553-2002, 48% раствор TiCl4*nH2O, ПромХим, г. Пермь) в концентрации ионов Ti4+, составляющей x = 0,15-0,16 по отношению к общей концентрации ионов металла [x = Ti/(Ca + Ti)]:

$$Ca10(PO4)6(OH)2 + x/2Ti4+$$
$$+ (Ca10\text{-}xTix/2)(P04)6(OH)2 + xCa2+ + x/2\ VCa2+$$

где: VCa2+ – вакансия.

В исходном био-ГА отношение Ca/P находилось в диапазоне 1,79-1,85. Синтез проводили в течение 24 час при 20 °С, pH до 7 доводили NH4OH. Продукты реакции фильтровали и промывали дистиллированной водой, после чего сушили в воздушной печи при 80 °С в течение 24 часов, затем прокаливали при 500 °С в течение 2 часов.

Характеристика образцов. Кристаллические фазы были идентифицированы методом рентгеновского фазового анализа (РФА) с использованием дифрактометра «ARL X'TRA Thermo Fisher Scientific» с излучением Cu-Kα (λ = 0,15418 нм).

Применялись ускоряющее напряжение 40 кВ и ток излучения 40 мА. Морфологию, размер частиц и распределение их по размерам исследовали с помощью РЭМ на EXplorer Aspex (FEI). ИК-спектры образцов с преобразованием Фурье регистрировались с помощью ИК-спектрометра ФТ-801 НПФ «Симекс». Элементный анализ проводили методом EDS на РЕАН модели 01 АО «Научные приборы», СПб, 20 кВ.

Результаты исследований. РФА исследуемых образцов приведен на рис. 1. Близкие ионные радиусы Ti2+ в титанил-ионе TiO^{2+} 1,36 Å и Ca^{2+} 1,33 Å в тройной связи соединения $Ca_3(PO_4)_2$, как основного элемента структуры ГА, предполагают сохранение объема элементарной ячейки для катион-замещенного ГА при данной степени замещения.

Внедрение титана Ti^{4+}, r = 0,68 Å, вероятно, вообще не затруднено. Поэтому наблюдаются достаточно близкие рефлексы на дифрактограммах при замещении Ca^{2+} на Ti^{4+}.

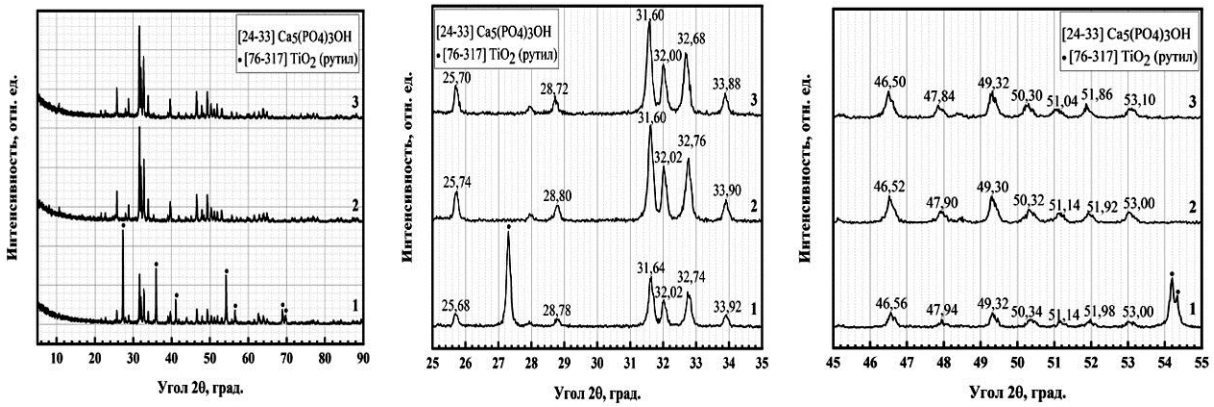


Рис. 1. РФА образцов: а – био-ГА+TiO_2 = 1:1, б – био-ГА(Ca,Ti), синтез в i-C_3H_7OH, в – био-ГА(Ca,Ti), синтез в CCl_4

Присутствие титана в синтезируемых образцах подтверждается ЭДРА (рис. 2).

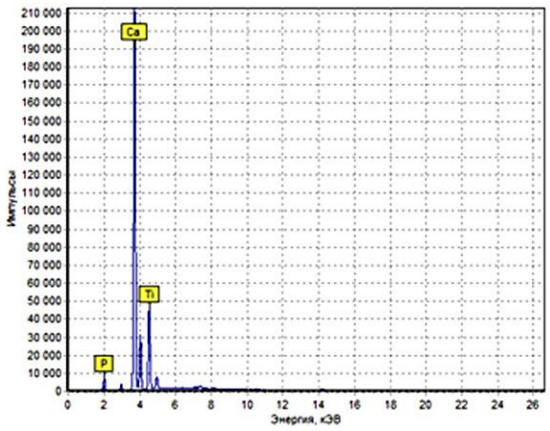


Таблица концентраций "ГА-4_17фвр25"

NN	Элемент	Концентрация, %
1	P	37.38
2	Ca	52.92
3	Ti	9.7

Ca/P = 52,92 /37,38 = 1,42
Ti/Ca+Ti = 9,7/52,92+9,7 = 9,7 /62,62 = 15,49
био-ГА(Ca,Ti), синтез в i-C3H7OH

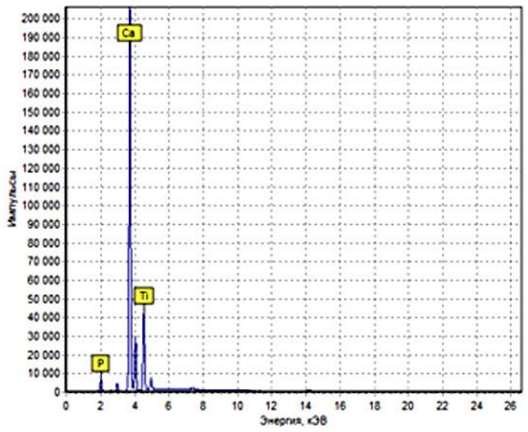


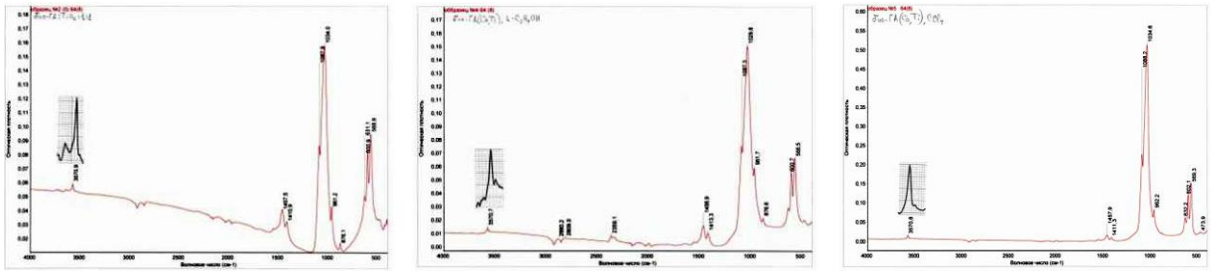
Таблица концентраций "ГА-5_17фвр25"

NN	Элемент	Концентрация, %
1	P	38.72
2	Ca	52.04
3	Ti	9.24

Ca/P = 52,04 /38,72 = 1,34; Ti/Ca+Ti = 9,24/52,04+9,24 = 9,24/61,28 = 15,08
био-ГА(Ca,Ti), синтез в CCl4

Рис. 2. ЭДРА синтезированных образцов

Анализ ИК-спектров (рис. 3) термообработанных образцов при 600 °С показал, что частоты колебаний основных групп PO43-, O-P-O, OH, в основном, соответствуют био-ГА. Пик при 631-632 см-1, характерный для чистого ГА, присутствует в анализируемых образцах. Наличие Ti в $(Ti,Ca)_{10}(PO_4)6(OH)_2$ не оказывает дестабилизирующее действие на структуру образцов.



а б в

Рис. 3. ИКС образцов: а – био-ГА+TiO_2 = 1:1, б – био-ГА((Ca,Ti), синтез в i-C_3H_7OH, в – био-ГА(Ca,Ti), синтез в CCl_4

Характеристика фотокаталитической активности. Фотокаталитическую активность оценивали по разложению метиленового синего (C16H18N3ClS, МС) в его водном растворе при комнатной температуре (20 °С). В стеклянный стакан на 250 мл помещали 0,2 г порошка фотокатализатора, добавляли 200 мл раствора МС с концентрацией 30 мг/л, оставляли перемешиваться на магнитной мешалке под действием излучения от

источника света с ксеноновой лампой (VIS) Gloria-X500A (Zolix, Китай) и лампы ДРЛ-250 (UV). Через каждый час отбирали пробу объемом 5 мл, отделяли порошок фотокатализатора методом центрифугирования.

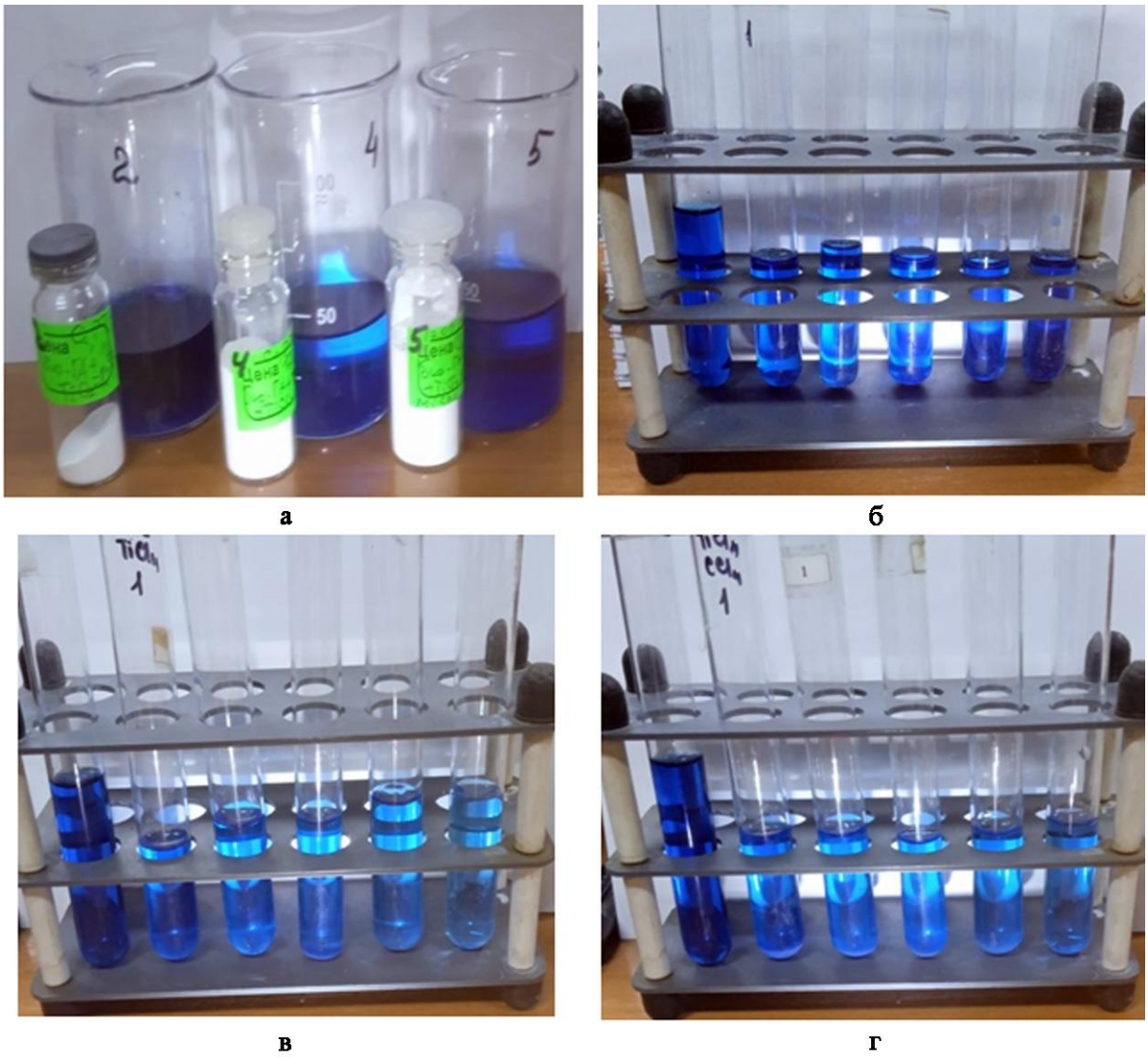


Рис. 4. Фотокаталитическая активность (VIS) образцов: а – после внесения навесок через 1…5 ч, слева био-ГА+TiO_2 = 1:1, по центру био-ГА(Ca,Ti), синтез в i-C_3H_7OH, справа образец био-ГА(Ca,Ti), синтез в CCl_4, б – образец био-ГА+TiO_2 = 1:1 в течение 1-5 ч, в – образец био-ГА(Ca,Ti), синтез в i-C_3H_7OH, в течение 1-5 ч, г – образец био-ГА(Ca,Ti), синтез в CCl_4, в течение 1-5 ч

Изменение концентрации МС для мономерной формы в растворе с течением времени вследствие адсорбции, или разложения, определяли по относительной оптической плотности на длине волны 665 нм с использованием уравнения x = C/C0 = A/A0, A0 = 2,5, кювета кварцевая 10 мм, спектрофотометр UV-VIS Evolution 300 (Thermo Scientific, США). Особенно заметно постепенное обесцвечивание красителя в случае образцов био-ГА(Ca,Ti), синтез в i-C_3H_7OH (рис. 4, в) и био-ГА(Ca,Ti), синтез в CCl_4 (рис. 4, г).

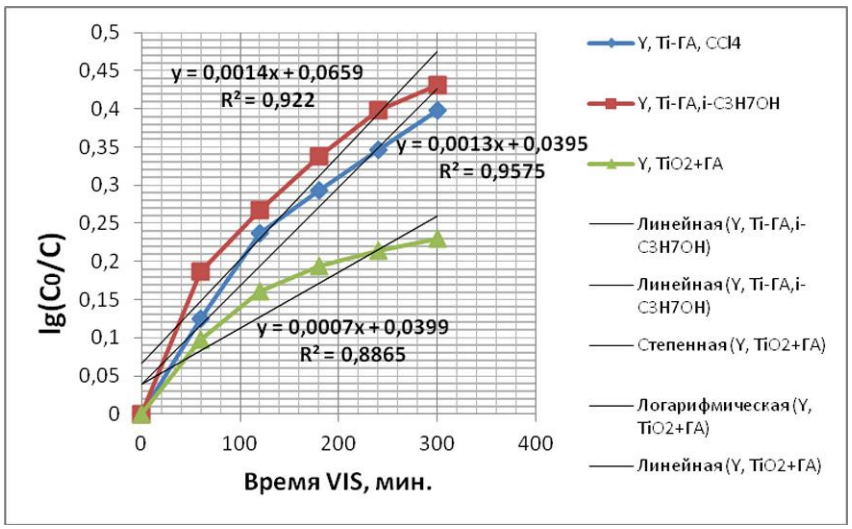
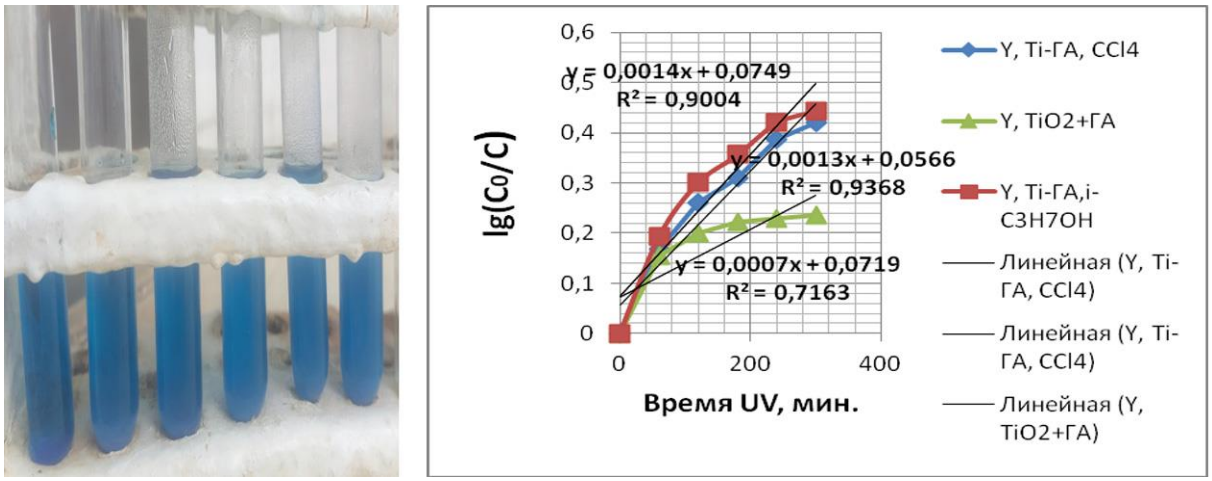


Рис. 5. Изменение относительной концентрации МС
от времени при VIS-облучении

Это, вероятно, обусловлено высокой адсорбционной способностью и фотоактивностью ГА, допированного титаном, как в VIS, так и UV, рис. 5-6.



а б

Рис. 6. Изменение относительной концентрации МС
от времени под действием УФ – облучения: а – био-ГА+TiO_2 = 1:1,
после облучения через 1-5 ч, б – график

Выводы: проведен синтез и подтверждена структура биогенного Ti,Ca-ГА. Исследовано влияние замещения катиона Ca на катион Ti в интервале концентраций от 15 до 16 ат. % на формирование гидроксиапатита. При введении катиона Ti основной образующейся фазой является био-ГА. Выявлено сохранение объема элементарной ячейки для катион-замещенного ГА при данной степени замещения. Наиболее высокой адсорбционной способностью и фотоактивностью обладает гидроксиапатит, допированный титаном био-ГА(Ca,Ti), синтезированный в i-C_3H_7OH.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. . Preparation and characterization of a titanium-substituted hydroxyapatite photocatalyst / Anmin Hu, Ming Li, Chengkang Chang, Dali Mao // Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 267 (2007), p. 79-85.

2. Nishikawa H, Kato S, Ando T. Rapid and complete oxidation of acetaldehyde on TiO2 photocatalytic filter supported by photo-induced activated hydroxyapatite // J. Mol. Catal. A Chem. 2005. № 236. pp. 145-148.

3. Lee M.S., Hong S.S., Mohseni M. Synthesis of nanosized TiO2/SiO2 particles in the microemulsion and their photocatalytic activity on the decomposition of p-nitrophenol // J. Mol. Catal. A Chem. 2005. № 242. pp. 135-140.

4. You X.F., Chen F., Zhang J.L., Anpo M. A novel deposition precipitation method for preparation of Ag-loaded titanium dioxide // Catal. Lett., V. 102, Issue 3-4, 2005. p. 247-250.

5. Zielinska B., Morawski A.W. TiO2 photocatalysts promoted by alkali metals // Appl. Catal. B Environ. 2005. № 55. pp. 221.

6. Mrowetz M., Balcerski W., Colussi A.J. Oxidative power of nitrogen-doped TiO2 photocatalysts under visible illumination. J. Phys. Chem. B, 108 (2004), p. 17269-17273.

7. Matos J., Laine J., Herrmann J.M. Effect of the Type of Activated Carbons on the Photocatalytic Degradation of Aqueous Organic Pollutants by UV-Irradiated Titania // J. Catal. 2001. № 200. pp. 10-20.

8. Combined use of photocatalyst and adsorbent for the removal of inorganic arsenic (III) and organoarsenic compounds from aqueous media / Nakajima, Y.H. Xu, Y. Mori, M. Kishita, H. Takanashi, S. Maeda, A. Ohki, J. Hazard // Mater. 2005. B120. pp. 75-80.

9. Reddy E.P., Davydov L., Smirniotis P. TiO2-loaded zeolites and mesoporous materials in the sonophotocatalytic decomposition of aqueous organic pollutants: the role of the support // Appl. Catal. B Environ. 2003. № 42. pp. 1-11.

10. Mohseni M. Gas phase trichloroethylene (TCE) photooxidation and byproduct formation: Photolysis vs. titania/silica based photocatalysis // Chemosphere.2005. № 59. pp. 335-342.

11. Microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered zirconia-hydroxyapatite nano-composite powders / Kumar, R., Prakash, K. H., Cheang, P., and Khor, K. A.. Acta Materialia 200553 (8), p. 2327-2335.

12. Herve F., Fouache F., Marche C., Tillement J.P. Abnormal microheterogeneity detected in one commercial alpha 1-acid glycoprotein preparation using chromatography on immobilized metal affinity adsorbent and on hydroxyapatite. J. Chromatogr. B, 688 (1997), p. 35-37.

13. Bailliez S., Nzihou A. The kinetics of surface area reduction during isothermal sintering of hydroxyapatite adsorbent. Chem. Eng. J. 2004; 98, p. 141-152.

14. Harumitsu N., Shinji K., Takahiro A. Rapid and complete oxidation of acetaldehyde on TiO2 photocatalytic filter supported by photo-induced activated hydroxyapatite. J. Mol. Catal. A Chem., 236 (2005), p. 145-148.

15. Nishikawa H., Omamiuda K. Mild hydrogenation of quinoline: 1. Role of reaction parameters. J. Mol. Catal. A Chem., 179 (2002), p. 193-198.

16. Nishikawa H. Photocatalytic activity of hydroxyapatite based on photo-induced excitation. J. Mol. Catal. A Chem., 206 (2003), p. 331-338.

17. Nishikawa H. A treatment of carbonaceous wastes using thermal plasma with steam. J. Mol. Catal. A Chem., 207 (2004), p. 149 -154.

18. Feng Q.L., Cui F.Z., Kim T.N., Kim J.W. Ag-substituted hydroxyapatite coatings with both antimicrobial effects and biocompatibility, J. Mater. Sci. Lett.18 (1999), p. 559-561.

19. Wakamura M., Hashimoto K., Watanabe T. Photocatalysis by calcium hydroxyapatite modified with Ti(IV): Albumin decomposition and bactericidal effect. Langmuir, Volume 19, Issue 8, 15 April 2003, p. 3428-3431.

20. Komazaki Y., Shimizu H., Tanaka S. A new measurement. method for nitrogen oxides in the air using an annular diffsion scrubber coated with titanium dioxide. Atmos. Environ., 33 (1999), p. 4363-4371.

21. Chuan X.Y., Hirano M., Inagaki M. Photocatalytic Decomposition of Methylene Blue Waste Water by Using Pt Nanoparticles Modified TiO2 Film Photocatalysts. Appl. Catal. B. Environ., 51 (2004), p. 255-260.

22. Викулова М.А., Шигаев М.Ю., Мохамед Ахмед Мохамед Али, Костин К.Б., Пивоваров А.В., Пичхидзе С.Я. Влияние замещения кальция на титан на фазообразование и структуру био-гидроксиапатита // Научный альманах. 2025. № 3 -3(125), с. 9-15. URL: https://ukonf.com/doc/ na.2025.03.03.pdf.

23. Антонов В.А., Викулова М.А., Зотов И.В., Маркелова О.А., Костин К.Б., Пичхидзе С.Я. Анализ плазмонапыленного биогенного Ti,Ca-гидроксиапатита. Технологии и техника: пути инновационного развития: сборник научных статей 3-й Международной научно-технической конференции (17 июня 2025 года) (отв. ред. Смоленцев Е.В.); Воронежский государственный технический университет – Курск: Изд-во ЗАО Университетская книга, 2025. – с. 30-34.

ЭЛЕКТРОЛИЗНОЕ БОРИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ХИРУРГИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ

С.А. Глухова, А.А. Гоц
Научный руководитель: к.х.н., доцент Гоц И.Ю.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В статье рассматривается технология борирования стали Х12МФ для повышения эксплуатационных характеристик хирургических инструментов. Представлены результаты исследования на изно-*

состойкость. Обоснована эффективность метода и приведены рекомендации по его промышленному применению.

Ключевые слова: *борирование, хирургический инструмент, Х12МФ, износостойкость, электролиз*

Современная медицина предъявляет высокие требования к качеству хирургических инструментов. Одним из методов повышения их эксплуатационных характеристик является борирование.

Наиболее перспективным является электролизное борирование, позволяющее получать прочные и коррозионностойкие покрытия при низких температурах обработки.

По нашей технологии процесс борирования проводится в боросодержащем электролите на основе $Na_2B_4O_7$ с добавлением KBF_4. Температура процесса – 550 °С, плотность тока – 0,2 А/см^2. Время обработки – 2 часа. Образующиеся боридные фазы Fe_2B и FeB обеспечивают высокую твердость (до 2200 HV) и износостойкость покрытия.

Благодаря устройству абразивного шарового истирания константа Ш2 УАЛТ.246.000.00ПС образуется сферообразная выемка износа. Далее выемку измеряем на МБС-10, а значения переводим в реальный размер.

Измерения после испытания получились следующими (табл. 1).

Таблица 1

Результаты вычислений показателей на износостойкость

Образец	Тип образца	Показание по шкале
1	Горячекатаный	6,0
2		5,0
3		6,0
4		3,0
5		5,5
6	3D-печатный	4,5
7		6,0
8		6,5
9		6,0
10		5,5

Измерения размеров отпечатков проводились на микрошкале МБС-10 с увеличением 7 и окуляром ×8. Значения отпечатков указаны по шкале, где 1 мм – это показание по шкале МБС-10.

Переводя значения из табл. 2, получаем следующее выражение:

Реальный размер = Показание по шкале ×0,14 мм,

где 0,14 мм – масштабный коэффициент при увеличении 7.

Таким образом, осуществляем перевод показаний шкалы в реальный размер (табл. 2).

Таблица 2

Перевод показания шкалы в реальный размер, мм

Образец	Показание по шкале	Реальный размер отпечатка, мм
1	6,5	0,91
2	5,5	0,77
3	6	0,84
4	3	0,42
5	5,5	0,77
6	4,5	0,63
7	6	0,84
8	6,5	0,91
9	6	0,84
10	5,5	0,77

Расчет толщины покрытия выполняется по результатам измерения выемки модели «шар-плоскость».

$$h = \frac{\frac{\pi}{2} \times \frac{d}{2} \times (D - \sqrt{D^2 - d^2})}{\pi \times D - \sqrt{D^2 - d^2}},$$

где D – диаметр шара, 20 мм; d – диаметр отпечатка

Рассчитаем h для каждого образца, а для удобства расчётов определим по формулам:

$$\sqrt{D^2 - d^2} = \sqrt{20^2 - d^2} = \sqrt{400 - d^2},\ r = \frac{d}{2}$$

Таким образом, результаты получаются следующими и занесены в табл. 3.

Таблица 3

Подсчеты и результаты измерений глубины износа, мм

Образец	d, мм	r	$D - \sqrt{D^2 - d^2}$	$\pi \times D - \sqrt{D^2 - d^2}$	h, мм
1	0,91	0,455	0,022	42,854	0,000366
2	0,77	0,385	0,015	42,847	0,000211
3	0,84	0,42	0,018	42,849	0,000277
4	0,42	0,21	0,004	42,835	0,000031
5	0,77	0,385	0,015	42,847	0,000211
6	0,63	0,315	0,010	42,841	0,000115
7	0,84	0,42	0,018	42,849	0,000277
8	0,91	0,455	0,022	42,854	0,000366
9	0,84	0,42	0,018	42,849	0,000277
10	0,77	0,385	0,015	42,847	0,000211

Глубина износа h лежит в диапазоне от 0,00003 до 0,00037 мм – это микроуровень, который соответствует ожиданиям для трения с таким большим шаром и микронным абразивом.

Анализ износостойкости образцов стали Х12МФ для хирургических иглодержателей показал, что наилучшие результаты демонстрируют об-

разцы, прошедшие полную закалку с масляным охлаждением. Независимо от метода изготовления – горячей прокатки или 3D-печати – такой режим термообработки обеспечивает минимальную глубину износа, что свидетельствует о высокой твердости и устойчивости поверхности. В частности, образцы № 4 (горячекатаный) и № 8 (3D-печатный) показали наилучшие результаты, подтверждая эффективность этого метода.

В то же время неполная закалка с воздушным охлаждением приводит к повышенному износу из-за менее оптимальной микроструктуры стали. Однако сравнение двух технологий изготовления выявило, что 3D-печатные образцы при правильной термической обработке могут достигать износостойкости, сопоставимой с традиционными методами. Это открывает перспективы для применения аддитивных технологий в производстве хирургических инструментов при условии точного контроля режимов термообработки. Таким образом, оптимальной комбинацией для повышения износостойкости борированных изделий из стали Х12МФ является применение полной закалки с масляным охлаждением, вне зависимости от метода изготовления заготовок. Эти условия обеспечивают формирование прочного, износостойкого покрытия, что особенно важно для долговременной эксплуатации хирургических иглодержателей в условиях механического трения и повышенных нагрузок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 5950-2000. Стали инструментальные легированные.
2. Williams D.F. Corrosion of Surgical Instruments. Biomaterials, 2008, 13 с.
3. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. Москва: Машиностроение, 1990. 528 с.
4. Николаев Г.П. Борирование сталей: теория и практика. Санкт-Петербург: Профессия, 2020. 248 с.
5. Ковалев А.В. Электрохимические методы упрочнения металлов. Москва: Машиностроение, 2021. 208 с.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ НА ТОЛЩИНУ ЕЕ ОКСИДНОЙ ПЛЕНКИ

С.Д. Гостев
Научный руководитель: к.х.н., доцент Гоц И.Ю.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В работе описывается исследование влияния температуры и длительности нагрева, во время полного отжига, стали 20Х23Н18*

и сплава ХН65МВУ, используемых в качестве материала для изготовления стеклоформующей оснастки, на изменение толщины их оксидной пленки.

Ключевые слова: *толщина оксидной пленки, термическая обработка стали, полный отжиг, сплав ХН65МВУ, сталь 20Х23Н18*

Одними из наиболее распространенных конструкционных материалов являются стали. Это связано с одновременным сочетанием в них различных физических свойств, позволяющие использовать стали практически во всех областях промышленности. Но у всех сталей присутствует один недостаток – склонность к коррозии. Коррозионные процессы нарушают целостность структуры материала, приводя к его постепенному разрушению. Существуют различные методы защиты металлов от коррозии и одним из них является создание на его поверхности различных покрытий или пленок [1, 2]. Пленки могут быть как искусственные (нанесенные на поверхность металла различными методами [см. например 3]), так и естественные, образующиеся на поверхности вследствие окисления металла при воздействии окружающий среды, т. е. при протекании коррозионных процессов. Но не все оксидные пленки будут являться защитными. Например одним из важнейших факторов, которым должна обладать окисная пленка, чтобы стать защитной, является сплошность [4], но, как известно [5], помимо сплошности, на защитные свойства пленки влияет ее толщина.

Одним из методов получения оксидной является дополнительная температурная обработка металла. При этом различные режимы температурной обработки одного и того же металла будут существенно влиять на свойства получаемой оксидной пленки. Данный факт подтвержден во многих научных работах [см. например 6]. В связи с чем было решено провести исследования по изменению толщины оксидной пленки на поверхности нержавеющих сталей, в зависимости от температуры и длительности дополнительной термической обработки. В качестве исследуемого материала были взяты нержавеющая жаропрочная сталь 20Х23Н18 и коррозионностойкий сплав ХН65МВУ (химический состав указан в таблицах 1 и 2), которые используются в качестве материала для изготовления оснастки, применяемой при производстве стеклянных изделий.

Таблица 1

Химический состав стали ХН65МВУ

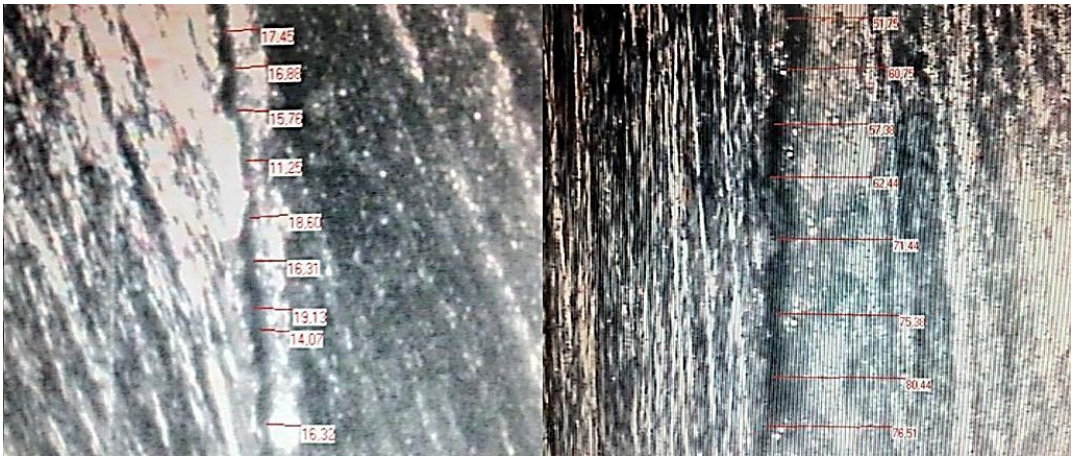
Ni	Mo	Cr	W	Mn	Fe	Si	C	P	S
60-67	15-17	14 -16	3 – 4,5	До 1	До 0,5	До 0,1	До 0,02	До 0,015	До 0,012

Таблица 2

Химический состав нержавеющей стали 20Х23Н18

Cr	Ni	Mn	Si	C	S	P	Fe
22-25 %	17-20 %	До 2	До 1	До 0,2	До 0,02	До 0,035	остальное

В качестве вида термической обработки был выбран полный отжиг, так как он является наиболее простым и удобным в исполнении. Температура отжига была выбрана выше точки Ac3 системы железо – углерод для аустенитной доэвтектоидной стали, которой являются исследуемые образцы. Длительность выдержки была определена из различных литературных источников и составила 30 и 180 минут для каждой из температур нагрева. Замеры толщины полученной оксидной пленки производились с использованием анализатора изображений микроструктур АГПМ – 6М с компьютерной программой «Металлограф» (рис. 1).



а б

Рис. 1. Изображения торцов термически обработанных образцов стали 20Х23Н18 с измерениями толщины поверхностной оксидной пленки, сделанные с использованием анализатора изображений микроструктур АГПМ – 6М с компьютерной программой «Металлограф»: а – торец образца после отжига при температуре 950 °С с выдержкой 180 мин., б – торец образца после отжига при температуре 1200 °С с выдержкой 180 мин

Таблица 3

Результаты замеров толщины оксидной пленки на образцах стали 20Х23Н18 и сплава ХН65МВУ после различных режимов полного отжига

Т°С / t мин	Толщина пленки сплава ХН65МВУ, мкм	Толщина пленки стали 20Х23Н18, мкм
950 / 30	13,2 (± 2)	12,1 (± 2)
950 / 180	14,2 (± 2)	14,9 (± 5)
1050 /30	28,5 (± 4)	32,3 (± 3)
1050 /180	36,2 (± 3)	35,1 (± 5)
1100 / 30	44,3 (± 5)	34,3 (± 2)
1100 /180	61,2 (± 8)	42,2 (± 7)
1200/30	24,3 (± 4)	52,4 (± 9)
1200/180	21,5 (± 3)	69,4 (± 12)

Анализ полученных результатов (табл. 3) показал, что с увеличением температуры нагрева и длительности выдержки толщина оксидной пленки

исследуемых образцов возрастает, что согласуется с аналогичными исследованиями [7, 8]. При этом повышение температуры нагрева оказывает большее влияние, чем увеличение длительности выдержки. Стоит отметить, что у сплава ХН65МВУ при превышении температуры нагрева в 1100 °С толщина пленки резко уменьшилась; предположительно, это связано с тем, что на более высоких температурах происходит ее разрушение. При этом у стали 20Х23Н18 подобного уменьшения толщины не наблюдалось.

Выводы

В работе были проведены замеры толщины оксидной пленки, образующейся на поверхности нержавеющих сталей и сплавов (20Х23Н18 и ХН65МВУ) после полного отжига при различной температуре нагрева и длительности выдержки. Было показано влияние температурно-временных режимов отжига на толщину получаемой оксидной пленки, в том числе отмечено, что при превышении порога в 1100 °С происходит разрушение пленки у сплава ХН65МВУ, что приводит к уменьшению ее толщины.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бутуханов В.А., Лыгденов Б.Д., Цыреторов Б.Ш. Диффузионное упрочнение штамповой оснастки // Актуальные проблемы в машиностроении. 2014. № 1. С. 459-466.

2. Якушкин А.А., Высекайло Ф.И. Проблемы разрушения поверхности оболочек тепловыделяющих элементов ядерных энергетических установок // Вестник Моск. гос. обл. унт-та. Сер. Физика-математика. 2018. № 4. С. 92-111.

3. Патент 2772538 Рос. Федерация, МПК С 23 С 14/35. Способ антикоррозионной защиты лопаток двигателей и турбин / В.З. Пойлов, П.В. Сковородников, О.В. Погудин; патентообладатель ФГАОУВО «ПНИПУ». № 2021139589; заявл. 29.12.21; опубл. 23.05.22, Бюл. № 15. 6 с.

4. Отс А.А. Коррозия и износ поверхностей нагрева котлов. Москва: Энергоатомиздат, 1987. 272 с.

5. Коррозия и защита металлов: учебно-методическое пособие: в 2 ч. Ч. 1. Методы исследований коррозионных процессов / Н.Г. Россина, Н.А. Попов, М.А. Жилякова, А.В. Корелин. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 108 с.

6. Гостев С.Д., Гоц И.Ю. Критерий Пиллинга-Бедвордса для оксидной пленки стали ХН65МВУ после различных режимов полного отжига // Справочник. Инженерный журнал. 2023. № 12. С. 8-13.

7. Ильин Р.Ю., Куц Л.Е. Исследование свойств поверхности нержавеющей хромоникелевой стали, упрочненной воздушно-термическим оксидированием // Сборник статей по матер. Междунар. науч.-техн. конф. Курск, 2023. Т. 3. С. 281-286.

8. Родионов И.В., Ромахин А.Н. Изменение микротвердости нержавеющей хромоникелевой стали 12Х18Н9Т при упрочняющей термической обработке на воздухе и в среде перегретого водяного пара // Сборник статей по материалам 2-й Междунар. молодеж. науч.-практ. конф. – Курск, 2012. – Т. 2. – С. 88-91.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ АНОДНОГО МАТЕРИАЛА НА ЕМКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИТАНОВОГО ИОНИСТОРА

А.А. Гоц
Научный руководитель: к.х.н., доцент Гоц И. Ю.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В работе рассмотрено влияние материала катода на электрические и емкостные характеристики плоского титанового ионистора, обратимо работающего по водороду.*

Ключевые слова: *титан, катодное внедрение, твердый электролит, углерод, диоксид марганца*

Двухслойный электрохимический конденсатор является электрохимическим устройством, работающим по принципу двойного электрического слоя. Между металлическими обкладками такого суперконденсатора находится твердый электролит или электролит на органической основе, создавая эклектический слой на межфазной границе металл/электролит. В результате подачи на устройство положительного или отрицательного потенциала происходит поляризация электродов и накопление заряженных частиц, и как следствие заряд накопителя энергии (рис. 1) [1-3].

В данной работе проведено исследование материала катода и материала твердого электролита на емкостные характеристики ионистора с титановым анодом. В качестве катодного материала использовали полимерные карбид титана и диоксид марганца толщиной 60 и 80 мкм соответственно. Твердые электролиты представляли собой пленки на основе:

– 10 % диацетата целлюлозы (ДАЦ) в диметилформамиде;

– 5 % поливинилового спирта в воде. Кроме того, в оба электролита были дополнительно введены токопроводящие добавки в количестве 2 % на основе солей галогенидов щелочного металла и азотсодержащих солей. Затем тонкопленочный электролит в чашках Петри подвергался сушке с последующей водно-солевой аэрацией и последующей дегидратацией в сушильном шкафу.

Получение же титанового анода осуществлялось последовательным модифицированием поверхности по методу катодного внедрения из органических и водно-органических растворов соответствующих солей.

После сушки осуществлялась сборка и герметизация устройства.

Зарядные емкости макетных накопителей энергии рассчитывали по следующей формуле:

$$C_{уд} = \frac{i\Delta\tau}{\Delta E m}, \quad (1)$$

где $C_{уд}$ – ёмкость конденсатора, Ф; $\Delta\tau$ – время заряда или разряда, с; i – ток разряда-заряда, А; m – масса электродов, г; ΔE – интервал потенциалов, в котором производится заряд-разряд, В.

Считалось, что вольт-фарадные характеристики при скоростях развертки потенциалов 0,1-10 мВ/с являются равновесными и изменение тока I пропорционально изменению ёмкости С.

Удельная энергия $E_{уд}$, Вт·ч/кг, отданная конденсатором при разряде на фиксированное сопротивление, рассчитывалась по соотношению

$$E_{уд} = \frac{C_{уд}U^2}{2} \quad (2)$$

где $C_{уд}$ – удельная ёмкость, Ф; U – напряжение, до которого заряжался накопитель энергии, В.

Удельная мощность рассчитывается по формуле

$$P_{уд} = \frac{E_{уд}}{\Delta t}, \quad (3)$$

где $P_{уд}$ – удельная мощность конденсатора, Вт/кг; Δt – время разряда [4, 5].

Принципиальная схема работы ионистора

Электрические и емкостные характеристики титанового ионистора

НРЦ, В	Q, мКл	С, мА•ч	$С_{конденсатора}$, Ф/г	$Е_у$, Вт·ч/кг	$Р_{уд}$, Вт/кг,	Система
0,5	45,04	810,72	22,52	45,04	1,002	LiEuTi/тв.эл.ДАЦ /MnO_2
0,5	42,00	756	21,00	42	0,757	LiEuTi/тв.эл.ДАЦ /TiC
1,7	3690	33213	922	4380	151	LiEuTiH/тв.эл.ПВС /MnO_2
1,1	3621	32589	905.25	7242	247	LiEuTiH/тв.эл.ПВС/TiC

Из результатов таблицы видно, что на электрические характеристики ионисторов наиболее существенное влияние оказывает не материал противоэлектрода – катода, а состав твердого электролита, обеспечивающий подвижность ионов в двойном электрическом слое.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Перспективные технологии использования биоводорода в энергоустановках на базе топливных элементов (обзор) / Д.О. Дуников [и др.] // Теплоэнергетика. – 2013. – № 3. – С. 48-48.

2. Satyapal S., Petrovic J., Thomas G. Gassing up with hydrogen // Scientific American. – 2007. – Vol. 296. – № 4. – P. 80-87.

3. Перспективы развития водородной энергетики / В.Ф. Бабкин [и др.] // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2016. – Т. 2. – № 1 (7). – С. 232-237.

4. Лукьянова В.О., Гоц И.Ю. Оценка диффузионно-кинетических и термодинамических характеристик Al-Sm-H сплавов // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2020. – Т. 22. – № 4. – С. 481-488.

5. Lukyanova V.O., Gots I.U. Assessment of diffusion-kinetic and thermodynamic characteristics of Al-Pr-H alloy obtained by the method of cathodic incorporation // Conference Proceedings – 4th Scientific School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics, DCNAIR. – 2020. – № 4. – P. 162-164.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЗУБНОГО ТИТАНОВОГО ИМПЛАНТАТА СО ШТОКОМ

М.В. Лавров, А.Ю. Щелкунов
Научный руководитель: д.т.н., профессор Пичхидзе С.Я.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

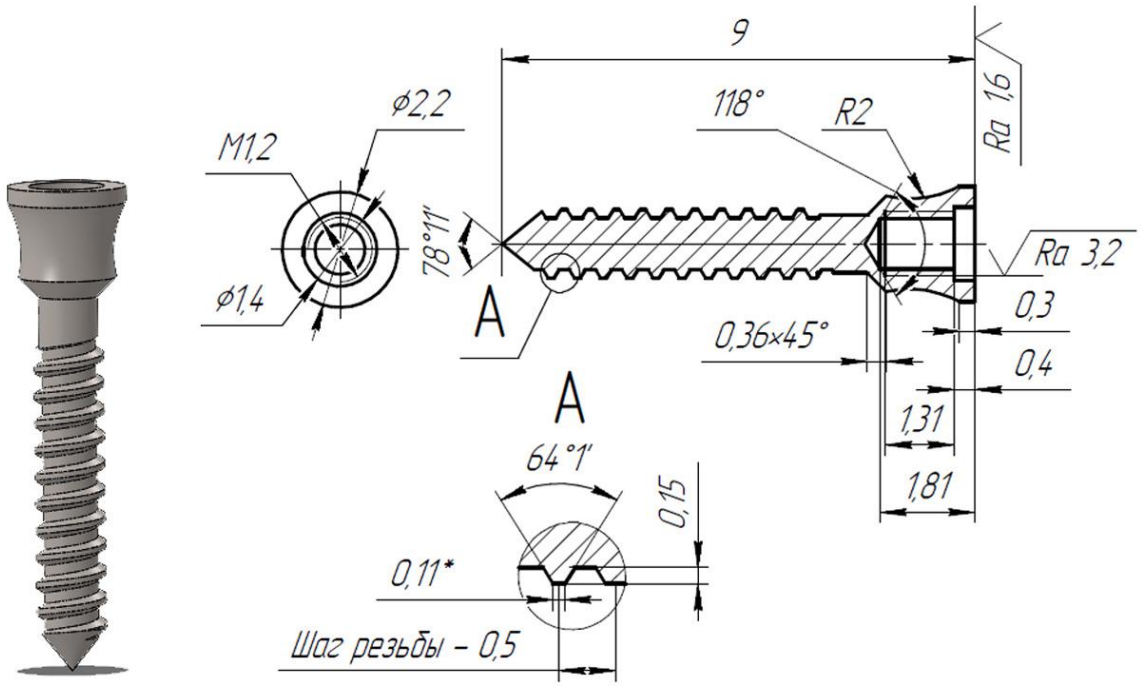
Аннотация. *Построена модель и разработан чертёж имплантата со штоком из технически чистого титана марки CP-TiUNSR50400 с пределом текучести 340 МПа. Исследованы прочностные характеристики при приложении вертикальной и горизонтальной нагрузок 250 Н. Приведены расчёты запаса прочности по полученным эпюрам напряжений. Рассмотрена возможность установки абатмента из технически чистого титана марки CP-TiUNSR50400.*

Ключевые слова: *стоматологический имплантат, протезирование, титан, абатмент*

Инфекции, связанные с имплантатами, и асептическое расшатывание являются одними из основных причин отказа имплантатов. Поэтому существует острая необходимость в улучшении остеоинтеграции и антибактериальных свойств материалов для имплантатов. В последние годы достигнуто множество прорывов в области биологического применения титана и его производных. Благодаря своей коррозионной стойкости, биосовместимости, способности к остеоинтеграции и антибактериальным свойствам они продемонстрировали значительный потенциал в области ортопедических и стоматологических имплантатов. Такие факторы как инфекция, травма, опухоли, врождённые пороки развития и возраст, могут привести к потере зубов и дефектам костной ткани. Кости челюстно-лицевой области обладают определённой способностью к самовосстановлению, но эта способность ограничена, и большие дефекты костной ткани не могут быть восстановлены самим организмом. После потери постоянных зубов в полости рта необходимо восстановить окклюзионную функцию. В этом отношении ортопедические и зубные имплантаты являются эффективными методами лечения дефектов костной ткани и потери зубов [1-5].

Цель работы: анализ прочностных характеристик конструкции зубного титанового имплантата при приложении вертикальных и горизонтальных нагрузок к имплантату 250 Н.

Для проведения исследований напряженно-деформируемого состояния (НДС) смоделирована конструкция зубного имплантата (рис. 1).



а б

Рис. 1. Модель имплантата из технически чистого титана марки CP-TiUNSR50400 (SS), предел текучести 340 МПа: а – 3D-модель, б – размеры зубного имплантата с резьбой под абатмент

В программе SolidWorks 2024 на зубной имплантат со штоком были приложены нагрузки для точного задания начальных условий исследования. Шток / абатмент задавался как жесткий объект для исключения его из расчета внутренних напряжений и возможности установки абатментов из различных материалов (сплавы титана, кобальт-хрома, керамики) (рис. 2) [6].

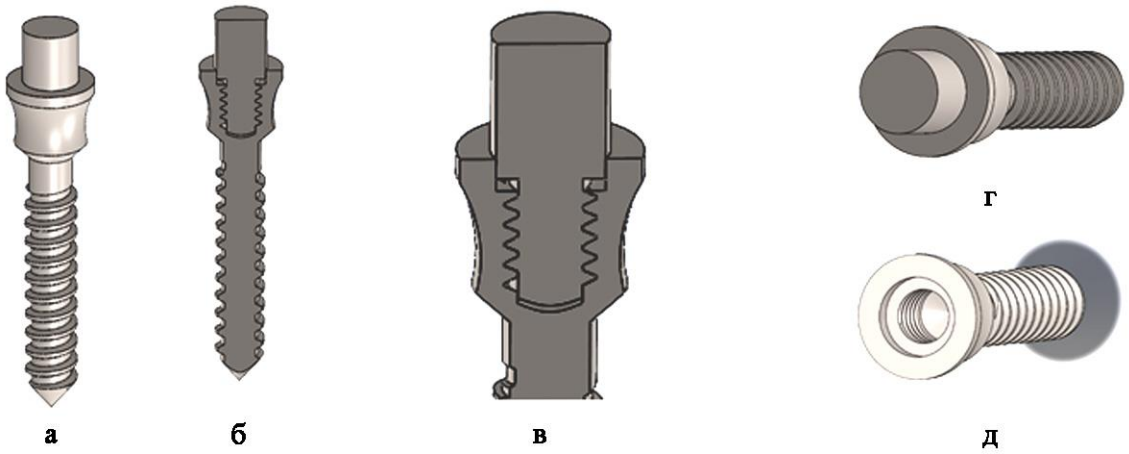


Рис. 2. Имплантат со штоком, где: а – вид спереди, б – с нижней частью штока, в – приближенный вид резьбы, г – изометрия имплантата с штоком, д – изометрия имплантата с резьбой под абатмент

Рассчитаны напряжения по Мизесу при приложении вертикальной и горизонтальной нагрузок 250 Н на верхнюю часть зубного имплантата со штоком/абатментом и запасы прочности (рис. 3).

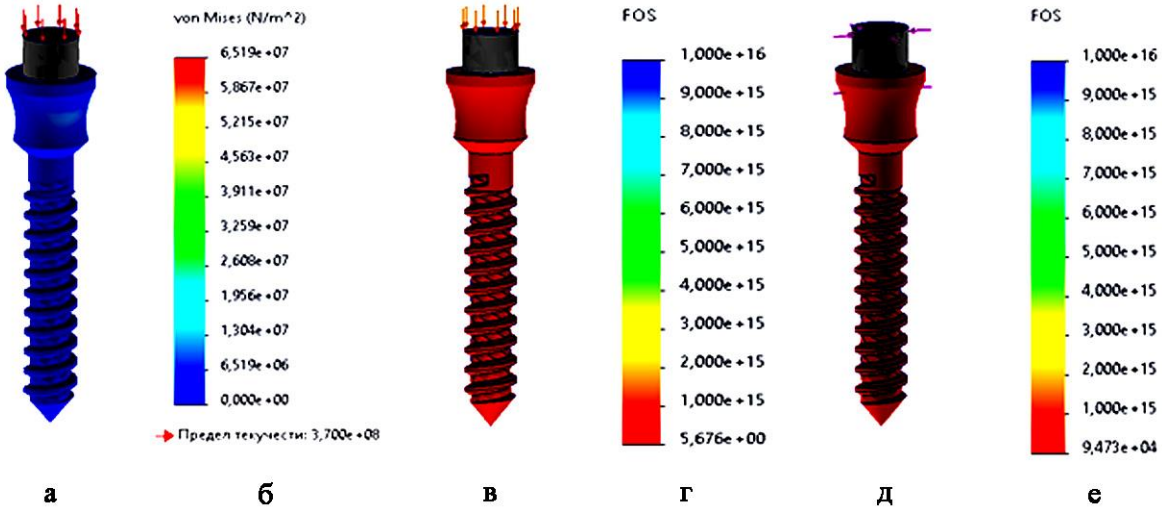


Рис. 3. Результаты расчета НДС при нагрузке 250 Н
а – модель зубного имплантата с напряжениями по Мизесу при нагрузке 250 Н на имплантат со штоком, б – эпюра напряжений; в – модель зубного имплантата с расчётом запаса прочности при нагрузке 250 Н на имплантат со штоком, г – эпюра запаса прочности; д – модель зубного имплантата с расчётом запаса прочности при горизонтальной нагрузке 250 Н на имплантат со штоком, е – эпюра запаса прочности

Полученные данные по запасам прочности при вертикальной и горизонтальной нагрузках 250 Н сведены в таблицу.

Приложенные нагрузки на имплантат и минимальные запасы прочности

Вид нагрузки	Приложенная нагрузка, Н	Запас прочности имплантата, ед.	Вывод по расчётам
Вертикальная	250	5,6	Приложенные жевательные нагрузки не разрушают зубной имплантат
Горизонтальная	250	$9{,}4 \cdot 10^4$	

Исходя из полученных данных таблицы, можно сделать вывод, что приложенная горизонтальная нагрузка на шток зубного имплантата является незначительной и в дальнейших расчётах её можно не учитывать.

При приложении нагрузки 250 Н к исследуемой модели зубного имплантата со штоком, запас прочности > 1. Следовательно, конструкция позволит выдерживать нагрузки на абатмент из технически чистого титана марки CP-TiUNSR50400, сохраняя работоспособность в челюсти пациента.

Выводы: проведен анализ конструкции зубного имплантата из титана. Показано, что конструкция надежная и выдерживает заданные нагрузки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Маркелова О.А., Телегин С.В. Электроплазменное напыление порошков замещенных фторгидроксиапатитов на металлические внутрикостные конструкции, предварительно обработанные лазерным излучением // Современные материалы, техника и технология: сборник научных статей 9-й Международной научно-практической конференции: в 2 т. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 38-40.

2. Таран В.М., Лясникова А.В., Дударева О.А. Основы конструирования и технологии производства медицинской техники: учеб. пособие для студ., магистрантов, преподавателей высш. учеб. заведений. Саратов: СГТУ, 2017. – 653 с.

3. Jemat A., Razali M., Otsuka Y. Surface modifications and their effects on titanium dental implants // BioMed Research International. 2015.

4. SolidWorks, Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Опинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 800 с.

5. Ogle O.E. Implant surface material, design, and osseointegration Ogle // Dental Clinics. 2015. Vol. 59. No. 2. P. 505-520.

6. Лавров М.В., Щелкунов А.Ю. Анализ конструкции зубного неразъемного соединения // Научный альманах. 2025. № 5-3 (127). С. 40-43. URL: https://ukonf.com/doc/na.2025.05.03.pdf

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦЕМЕНТАЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

И.А. Пустоведов, А.В. Войко
Научный руководитель: ассистент Войко А.В.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *Данная публикация является продолжением работы по влиянию химико-термической обработке на улучшение механических характеристик и биосовместимости титановых изделий медицинского назначения. Рассматривается влияние различных режимов нагрева на структуру и физико-механические характеристики титана марки ВТ1-0. Показано, что оптимальная температура цементации 1200-1300 °С обеспечивает повышение твердости материала и формирование качественного пленкообразующего покрытия толщиной порядка нескольких микрометров. Полученные результаты имеют важное практическое значение для производства медицинских имплантатов повышенной прочности и долговечности.*

Ключевые слова: *химико-термическая обработка, индукционный нагрев, титан, биосовместимость, микротвердость, цементирование*

Химико-термическая обработка эффективна, когда требуется получить вязкую сердцевину изделия с твердым и износостойким поверхностным слоем. Такой вид изделия будет экономически выгоднее в изготовлении [2]. Такой вид обработки может способствовать улучшению биосовместимости титана, увеличивая шероховатость, что позволяет изделиям медицинского назначения лучше взаимодействовать с тканями организма.

Представляется целесообразным рассмотреть понятие индукционного нагрева. Индукционный нагрев – это процесс нагрева заготовки переменными токами, возникающими в поверхностном слое заготовки. Преимуществом индукционного нагрева является возникновение тепла непосредственно в толще заготовки. Индукционные установки – это устройства, предназначенные для нагрева заготовок переменными токами высокой частоты [3].

Титан был выбран металлом, из которого создавались изделия медицинского назначения, поскольку является достаточно прочным и пластичным, обладает высокой химической активностью. Титановые остеофиксаторы – это медицинские имплантаты, используемые для фиксации и стабилизации костей в ортопедической хирургии. Титановые остеофиксаторы доступны в различных формах, которые выбираются в зависимости от конкретной клинической ситуации [4] (рис. 1).

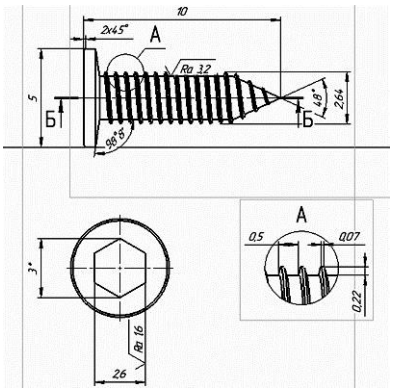


Рис. 1. Винт для остеосинтеза

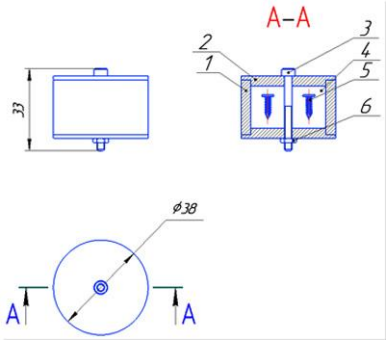


Рис. 2. Контейнер для ХТО, где: 1 – цилиндрическая поверхность контейнера, 2 – торцевые заслонки, 3 – стягивающий винт, 4 – углеродосодержащая среда (графит), 5 – винт для остеосинтеза, 6 – гайка

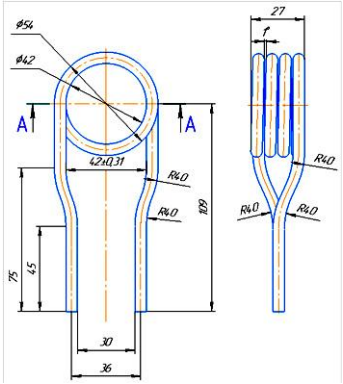


Рис. 3. Индуктор

Для проведения обработки остеофиксатора был разработан контейнер, рассчитанный на пакетную загрузку 6 изделий и изготовленный из технического титана марки ВТ1-0 (рис. 2).

Цилиндрическая поверхность контейнера имеет вид трубки с толщиной стенки 6,5 мм и внешним диаметром 48 мм. Контейнер выполнен из технического титана ВТ1-0 по ГОСТ 19807-91 [1].

Торцевые заслонки выполнены из технического титана марки ВТ1-00 по ГОСТ 19807-91 [1]. Имеют технологическое отверстие под винт для закрепления. Многовитковый индуктор изготовлен из медной трубки внешним диаметром 6 мм в соответсвии с ГОСТ 617-2006 [2] (рис. 3).

Для проведения ХТО были использованы образцы из технического титана ВТ1-0. Образцы имели диаметр 0,2 мм и длину 10 мм, тем самым имитируя резьбовую поверхность винта для остеосинтеза. Перед загрузкой образцов в контейнер, они очищались при помощи спиртового раствора.

Образец помещается в контейнер и засыпается мелкодисперсным углеродсодержащим порошком, который затем уплотняется. Разная плотность набивки карбюризатора может существенно повлиять на результаты эксперимента. Вес контейнера с изделием и набитым мелкодисперсным

углеродосодержащим порошком равен 103 г и не менялся на протяжении всего эксперимента, тем самым исключая возможность влияния плотности набивки на результаты эксперимента.

В процессе цементации контейнер нагревался до температуры 1000-1300 °С при выдержке 5 минут. Значение силы тока на индукторе варьировалось от 2,5 до 2,7 кА в зависимости от температуры. Температура определялась визуально и сравнивалась с градиентом температуры накала. После остывания контейнера извлеченные образцы чистились в УЗ – ванне в водном 40 % растворе этанола в течение 10 минут для удаления остатков графита (табл. 1).

Таблица 1

Режимы нагрева контейнера

Режим	Сила тока на индукторе $I_и$, кА	Частота тока f, кГц	Температура t, °С
1	2,5	72	1000
2	2,6	73	1200
3	2,9	72	1400
4	2,7	73	1300

В процессе ХТО было установлено, что нагрев до температуры 1400 °С влечет за собой перегрев поверхностного слоя образцов и, как следствие, отслаивание пленочного покрытия. Дальнейший анализ влияния цементации на механические свойства титана проводился при помощи измерения микротвердости поверхностного слоя на установке ПМТ-3 по методу Виккерса с использованием в качестве индентора четырехгранной пирамиды с алмазным наконечником. Суть данного метода заключается в нанесении отпечатка индентора на измеряемой поверхности при статической нагрузке. Длительность статической нагрузки указана в ГОСТ 9450-76 [1] и составляет 15 с.

Измерения проводились при нагрузке 20 гс (0,02 Н) при стандартном времени выдержки. Твердость технического титана, не подвергнутого ХТО, равна 200 HV. После проведения ХТО образцы имели различное по оттенку серо-матовое покрытие.

Для проведения микроанализа образцы заливались эпоксидной смолой для изготовления шлифа. В дальнейшем шлиф для микроанализа подвергался механической обработке, а именно грубой и чистовой шлифовке, на наждачной бумаге зернистостью от Р-180 до Р-5000. Измерения проводились на различном расстоянии от поверхностного слоя (табл. 2).

После проведения микроанализа результаты твердости диффузионного слоя на расстоянии <10 мкм составили 400±30 HV при нагрузке 20 гс и 386±35 HV при нагрузке 100 гс. Температура выдержки была равна 1000 °С. При повышении температуры до 1200 °С при нагрузках 20 гс

и 100 гс наблюдалось увеличение значения микротвердости до значений 498±81 HV и 450±64HV, соответственно.

Таблица 2

Результаты анализа твердости

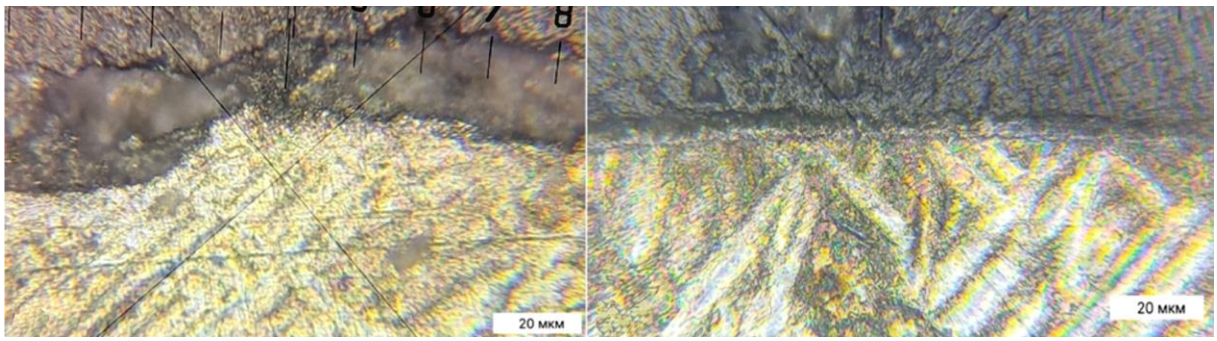
Режим обработки	Расстояние от поверхности	Твердость при нагрузке 20 гс	Твердость при нагрузке 100 гс
1	<10 мкм	400 ± 30 HV	386 ± 35 HV
	10-50 мкм	282 ± 89 HV	386 ± 35 HV
	50-500 мкм	212 ± 7 HV	238 ± 17 HV
2	<10 мкм	498 ± 81 HV	450 ± 64HV
	10-50 мкм	290 ± 16 HV	386 ± 34 HV
	50-500 мкм	202 ± 17 HV	221 ± 15 HV
3	<10 мкм	232 ± 26 HV	264 ± 10 HV
	10-50 мкм	209 ± 10 HV	264 ± 10 HV
	50-500 мкм	206 ± 13 HV	228 ± 7 HV
4	<10 мкм	402 ± 18 HV	489 ± 25 HV
	10-50 мкм	386 ± 20 HV	402 ± 18 HV
	50-500 мкм	206 ± 13 HV	203 ± 3 HV

При температуре выдержки, равной 1300 °С, было выявлено при нагрузке 20 гс снижение микротвердости диффузионного слоя до 402 ± 18 HV по сравнению с максимально полученным результатом при температуре 1200° С. Однако диффузионный слой стал более равномерным. При измерении микротвердости при нагрузке 100 гс наблюдалось увеличение твердости до значения 489 ± 25 HV на расстоянии <10 мкм от поверхности.

Нагрев до температуры 1400 °С повлек за собой самопроизвольное осталивание пленочного покрытия, твердость диффузионного слоя была снижена до значения 232 ± 26 HV при нагрузке 20 гс. Близкие значения микротвердости показало индентирование нагрузкой 100 гс.

Толщина упрочненного слоя при всех режимах обработки не превышала значения 50 мкм. Различия в значениях микротвердости при индентировании 20 гс и 100 гс объясняются наличием пористой структуры с пониженной твердостью.

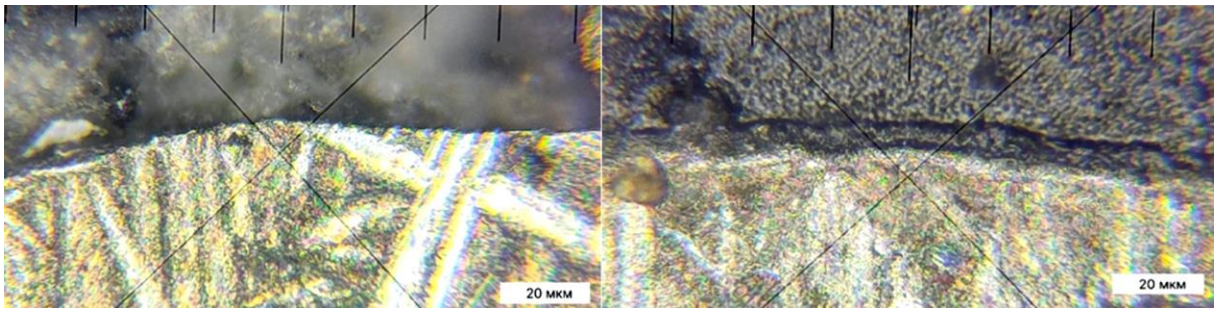
Для исследования микроструктуры металла после обработки необходимо провести травление. Травление технического титана марки ВТ1-0 проводилось при помощи плавиковой кислоты и в дальнейшем исследовалось на микроскопе МБС-10. Толщина диффузионного слоя определялась, исходя из параметров микротвердости, указанных в табл. 2. После проведения ХТО при первом режиме толщина пленки TiC составляла 2 мкм. Толщина диффузионного слоя составила 50 мкм. После проведения ХТО вторым режимом толщина пленки составила 3 мкм, толщина диффузионного слоя составила 50 мкм (рис. 4).



а б

Рис. 4. Образцы под микроскопом,
где а – после обработки первым режимом, б – после обработки вторым режимом

После проведения ХТО по третьему режиму было замечено самопроизвольное отслаивание покрытия. При цементации по четвертому режиму толщина пленочного покрытия составила 5 мкм, а толщина диффузионного слоя – 50 мкм (рис. 5).



аб

Рис. 5. Образцы под микроскопом,
где а – после обработки третьим режимом, б – после обработки вторым режимом

Выводы: достигнуто повышение микротвердости поверхностного слоя титанового образца в 2 раза. Максимальное полученное значение твердости диффузионного слоя образца в среднем составляет 489 ± 25 HV. Толщина пленочного покрытия в среднем при всех режимах обработки составила 3 мкм, а твердость – 800 HV. Максимальная толщина пленочного покрытия составила 5 мкм при температуре выдержки 1300 °С. Таким образом, обработка по такому режиму является наиболее эффективной. Результаты данного исследования позволят создавать более прочные и долговечные медицинские изделия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – Введ. 1977-01-01. – Москва: Изд-во стандартов, 1977. – 30 с.

2. Иванов С.Г. Разработка состава насыщающей смеси и технологии диффузионного борохромирования тяжелонагруженных деталей машин и инструмента: специальность 05.16.09 «Материаловедение (по отраслям)»: дис. … канд. техн. наук / Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. Барнаул, 2007. 175 с.

3. Фомин Н.И., Затуловский Л.М. Электрические печи и установки индукционного нагрева: учебник для электромех. техникумов. Москва: Металлургия, 1979. 247 с.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРОЧНЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛИ Х12МФ

С.А. Глухова, А.А. Гоц
Научный руководитель: к.х.н., доцент Гоц И.Ю.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Аннотация. *В статье представлен комплексный анализ современных методов упрочнения поверхности медицинских инструментов, изготавливаемых из стали Х12МФ. Рассматриваются четыре наиболее распространённые технологии – азотирование, цементация, лазерная закалка и электролизное борирование – с точки зрения их влияния на эксплуатационные характеристики изделий. Проведён сравнительный анализ технологических параметров, твёрдости, деформации и экономической эффективности каждого из методов. Особое внимание уделяется их применимости для тонкостенных конструкций, где критична геометрическая стабильность.*

Ключевые слова: *сталь Х12МФ, упрочнение поверхности, медицинские инструменты, износостойкость, деформация*

Сталь Х12МФ широко используется в производстве хирургических инструментов благодаря её высокой твёрдости и устойчивости к износу. Однако эксплуатационные условия – механическая нагрузка, воздействие биологических жидкостей и регулярные стерилизационные циклы – требуют дополнительного упрочнения поверхности. Особенно остро проблема стоит при обработке тонкостенных изделий, где важна минимизация термических деформаций. Наиболее применяемыми методами упрочнения являются азотирование, цементация, лазерная закалка и электролизное борирование (таблица).

Сравнение методов упрочнения

Параметр	Азотирование	Цементация	Лазерная закалка	Борирование
Твердость, HV	1000-1200	700-900	800-1000	1800-2200
Деформация	умеренная	высокая	минималь-ная	минимальная
Стоимость обработки	средняя	высокая	очень высо-кая	низкая
Производительность	низкая	средняя	высокая	высокая

Газовое азотирование проводится при температуре 500-600 °C и длительности обработки от 12 до 90 часов. Получаемая твёрдость составляет 1000-1200 HV. Метод относительно доступен, но имеет ограничения по эффективности при обработке высокохромистых сталей, к которым относится Х12МФ. Кроме того, при превышении толщины слоя 50 мкм возможно образование хрупкой зоны, снижающей надёжность инструмента.

Цементация, в отличие от азотирования, проводится при температуре 900-950 °C. При этом достигается твёрдость до 900 HV, однако метод приводит к значительной деформации тонкостенных деталей и сопровождается ростом зерна в аустенитной матрице. Это требует последующей правки изделий и ограничивает область применения технологии в производстве тонких и прецизионных компонентов.

Лазерная закалка привлекает возможностью локального воздействия с минимальной зоной термического влияния. Твёрдость обработанной зоны достигает 800-1000 HV. Несмотря на высокую стоимость оборудования, метод хорошо подходит для усиления конкретных участков изделий. Однако обработка большой площади или сложнопрофильных поверхностей может быть затруднена.

Электролизное борирование проводится при температурах 700-900 °C с выдержкой 2-4 часа. Этот метод позволяет формировать равномерное покрытие из боридов железа (Fe_2B, FeB) с твёрдостью до 2200 HV. Благодаря особенностям процесса, деформации изделия минимальны, что делает технологию особенно ценной для тонкостенных инструментов. Электролитическая природа процесса позволяет точно контролировать параметры и получать стабильные результаты при серийном производстве.

Сравнительный анализ методов показал, что электролизное борирование лидирует по показателям твёрдости и стабильности формы. Для медицинских иглодержателей, где критична сохранность насечек, борирование обеспечивает отклонения в пределах +0,02 мм, в то время как цементация даёт до +0,15 мм. При изготовлении скальпелей применение боридного слоя увеличивает ресурс режущей кромки в 5-7 раз. Для зажимов борирование сохраняет точность усилия сжатия за счёт отсутствия остаточной деформации.

Сравнение по основным технологическим и эксплуатационным характеристикам также свидетельствует в пользу электролизного борирования. При твёрдости 1800-2200 HV, этот метод сочетает минимальные деформации, высокую производительность и низкую себестоимость. В то время как азотирование и лазерная закалка уступают по твёрдости, а цементация – по стабильности формы и затратам.

Таким образом, электролизное борирование следует рассматривать как приоритетную технологию упрочнения для тонкостенных медицинских инструментов из стали Х12МФ. Для особо ответственных компонентов рекомендуется использовать комбинированные схемы, включающие борирование и последующее низкотемпературное азотирование, обеспечивающее дополнительную коррозионную стойкость. В перспективе целесообразно проведение работ по разработке экологически безопасных составов электролитов и автоматизированных систем управления технологическим процессом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 5950-2000. Стали инструментальные легированные.
2. Williams D.F. Corrosion of Surgical Instruments. Biomaterials, 2008.
3. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. Москва: Машиностроение, 1990.
4. Николаев Г.П. Борирование сталей: теория и практика. СПб.: Профессия, 2020.
5. Ковалев А.В. Электрохимические методы упрочнения металлов. Москва: Машиностроение, 2021.
6. ASM Handbook, Vol. 4A: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes. ASM International, 2013.

ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИИ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОКРЫТИЯ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ

А.В. Рябиничева
Научный руководитель: к.т.н., доцент Маркелова О.А.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

***Аннотация**. В ходе работы было проведено исследование влияния параметров предварительной обработки поверхности титана на адгезию напыляемого покрытия из гидроксиапатита. Рассмотрено влияние мор-*

фологии поверхности и фазового состава на адгезии остеобластов и показатели их пролиферации in vitro.

Ключевые слова: *гидроксиапатит, титан, адгезия, пескоструйная обработка, кислотное травление, плазменное напыление, биосовместимость*

Поверхностная подготовка титана перед нанесением биоактивных покрытий играет ключевую роль в обеспечении прочной фиксации покрытия и долговечности имплантата. Недостаточная шероховатость снижает адгезию, в то время как избыточная может вызвать микротрещины в покрытии. Для оптимизации параметров обработки необходимо изучение влияния конкретных режимов на характеристики получаемой поверхности.

В работе исследовались три группы титановых образцов марки ВТ1-0: с пескоструйной обработкой, с обработкой кислотным травлением и с комбинированной (последовательной) обработкой. Пескоструйная обработка проводилась абразивом Al_2O_3 (100 мкм) под давлением 0,4-0,6 МПа в течение 60 секунд. Кислотное травление – в смеси $HCl + H_2SO_4$ при температуре 60 °С в течение 10 минут.

После подготовки поверхности наносилось покрытие из гидроксиапатита методом плазменного напыления. Адгезионные свойства оценивались методом отрыва, а морфология поверхности – методом профилометрии.

Таблица 1

Влияние предварительной обработки на адгезию покрытия

Метод обработки	Средняя шероховатость Ra, мкм	Плотность пор, %	Прочность сцепления, МПа
Только пескоструйная	1,3	9	18,6
Только кислотная	1,8	13	21,2
Комбинированная	2,1	16	27,5

Результаты показали, что комбинированная обработка формирует наиболее развитую микрорельефную поверхность, которая обеспечивает максимальную адгезию – 27,5 МПа. Поверхности, обработанные только одним методом, демонстрировали худшие результаты, при этом кислотная обработка оказалась эффективнее пескоструйной.

Следует отметить, что при увеличении шероховатости более 2,5 мкм в других сериях наблюдались дефекты покрытия, что подтверждает наличие оптимального диапазона параметров.

Комбинированная пескоструйная и кислотная обработка поверхности титана позволяет добиться наиболее высокой прочности сцепления гидроксиапатитового покрытия за счёт формирования микроструктуры, способствующей механическому зацеплению и повышенной плотности

пор. Полученные данные позволяют рекомендовать комбинированную методику как предпочтительную при подготовке титановых имплантатов к нанесению биоактивных покрытий.

Далее исследовалась остеоинтеграция покрытия из гидроксиапатита, нанесенного плазменным методом. Биосовместимость имплантата – один из решающих факторов успеха остеоинтеграции. Наиболее перспективными покрытиями считаются те, что имитируют состав и структуру костной ткани. Гидроксиапатит ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) – основной неорганический компонент кости – широко применяется для модификации поверхности титановых имплантатов. Плазменное напыление позволяет сформировать прочный, пористый слой покрытия, однако его биологические характеристики в значительной степени зависят от его морфологии и химического состава.

Покрытие наносилось на титановые образцы марки ВТ1-0. Перед нанесением поверхность обрабатывали пескоструйным методом и методом кислотного травления.

Плазменное напыление проводилось при температуре дуги ~11 000 °С в аргоновой среде. Расход порошка составлял 30 г/мин, толщина полученного покрытия – от 60 до 80 мкм.

Таблица 2

Биологические характеристики поверхности после напыления ГА

Образец	Адгезия клеток, %	Пролиферация (7 сутки), %	Морфология клеток
Без покрытия	42	64	Вытянутые, слабо прикреплены
ГА, 85-90 %	78	93	Распластанные, активные
ГА+CaO >15 %	61	75	Частично сферические

Содержание фаз в напылённом покрытии определялось рентгенофазовым анализом. В среднем, доля кристаллического гидроксиапатита составляла 85-90 %, а примеси CaO – не более 15 %.

Биосовместимость оценивали по результатам адгезии и пролиферации остеобластов. На каждый образец наносили суспензию клеток, и на 1-е и 7-е сутки оценивали их приживаемость.

Как видно из таблицы, наилучшие показатели клеточной активности наблюдаются при содержании гидроксиапатита более 85 %. Морфологический анализ подтвердил наличие активных остеобластов с развитой цитоплазмой и выраженными фокальными контактами на поверхности с чистым ГА.

Исследование подтвердило, что покрытия из гидроксиапатита, нанесённые методом плазменного напыления, обладают высокой биосовместимостью при условии оптимального фазового состава. Покрытие с содержанием ГА не менее 85 % способствует активной адгезии и размножению остеобластов, что делает его перспективным для модификации титановых имплантатов в стоматологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Граница раздела покрытия гидроксиапатита с титановой подложкой / В.И. Калита, А.А. Радюк, Д.И. Комлев [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2016. – № 5. – С. 27-35.

2. Тимофеев М.Н., Солиман М.Н. К вопросу последовательного плазменного напыления порошков титана и гидроксиапатита // Школа молодых новаторов: сборник научных статей Международной молодежной научной конференции: в 2 т. Курск, 19 июня 2020 г. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – Т. 2. – С. 80-86.

3. Влияние подготовки поверхности детали на прочность сцепления покрытия при плазменном напылении / Кравченко И.Н., Карцев С.В., Величко С.А., Кузнецов Ю.А., Пастухов А.Г. // Новые огнеупоры. – 2021. – № 1(3). – С. 40-47.

4. Сибилева С.В., Каримова С.А. Обработка поверхности титановых сплавов для обеспечения адгезионных свойств (обзор) // Авиационные материалы и технологии. – 2013. – № S2.

5. Оценка влияния биоактивного покрытия винтовых дентальных имплантатов на сроки остеоинтеграции (экспериментально-морфологическое исследование) / М.Г. Перикова, С. Сирак, И. Казиева, А. Мартиросян // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. – С. 35.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ НАНЕСЕНИИ ПОРИСТЫХ ТИТАНОВЫХ ПОКРЫТИЙ

М.А. Фомина[1], Г.А. Фомин[1,2]
Научный руководитель: к.т.н. Кошуро В.А.[1], д.т.н., доцент Фомин А.А.[1]

[1]*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов*
[2]*Муниципальное общеобразовательное учреждение «Средняя общеобразовательная школа № 8 Волжского района г. Саратова», г. Саратов*

Аннотация. *В работе экспериментально изучены процессы массопереноса титановых электродов-инструментов при электроискровом нанесении (ЭИН) пористых покрытий на титановые образцы-диски. Определены электрические параметры оптимального процесса ЭИН и изменения массы титановых образцов после обработки, параметров морфологии поверхности, шероховатости и твердости. Предложены технологические рекомендации, обеспечивающие получение на титановых об-*

разцах пористых титановых покрытий с требуемыми параметрами структуры и повышенных механических свойств.

Ключевые слова: *электроискровое нанесение, титан, электрод-инструмент, обратная полярность, удельное время обработки, массоперенос, морфология поверхности, параметры шероховатости, твердость*

Известно, что титан и его сплавы достаточно часто используются в машино- и приборостроении. Его применение в медицине обусловлено уникальным комплексом физико-химических и механических свойств, в частности коррозионной стойкости и прочности [1]. Для улучшения его биологической совместимости с живыми тканями, в частности с костью, его поверхность изменяется за счет нанесения фукнциональных слоев, тонких пленок или пористых покрытий. Для получения таких конструкций с покрытиями применяют различные методы обработки поверхности, например химические и электрохимические, электрофизические и газотермические [2].

Указанные выше методы имеют ряд недостатков, в частности каждым из методов отделки поверхности сложно добиться сочетания остеоиндуктивного элементного состава и остеокондуктивной структуры поверхности, требуемой морфологии поверхности, открытой пористости и выраженной шероховатости, а также сниженного значения модуля упругости при повышенной прочности, твердости и износостойкости по сравнению с кортикальной костной тканью.

Многие недостатки можно устранить за счет применения некоторых электрофизических методов обработки поверхности металлоизделий, в частности электроискрового легирования (ЭИЛ) или электроискрового нанесения (ЭИН) пористого и шероховатого покрытия гомогенного или гетерогенного (разнородного) элементного состава [3]. Таким образом, в данной работе будет рассмотрен метод ЭИН пористых слоев титана на механически обработанную поверхность титановых образцов, будет установлено влияние энергетических (рабочий ток, полярность напряжения) и временных (скважность импульсов, длительность обработки на единицу площади) параметров импульсно-периодического воздействия плазмы искровых разрядов на эффективность массопереноса и качество покрытий.

Экспериментальные образцы имели форму диска диаметром 18 мм и толщиной 2 мм и были изготовлены из технического титана марки ВТ1-0. Электроды-инструменты также были изготовлены из технического титана, диаметр которых составил 3 мм при длине 25-30 мм. Радиус закругления у электродов-инструментов изменялся от 0,5-0,6 до 0,7-0,8 мм. При достижении максимума в результате обработки производилась замена электрода или его заточка.

Процесс ЭИН осуществлялся с помощью лабораторного комплекса для электрофизической модификации металлоизделий на базе прибора «Byes-400W» (B.YES, Китай) (рис. 1, п. 1). Основным параметром обработки являлся рабочий ток *I*, который изменялся от минимального значения 0,2 А и не превышал 5 А, что соответствовало максимальной мощности около 400 Вт.

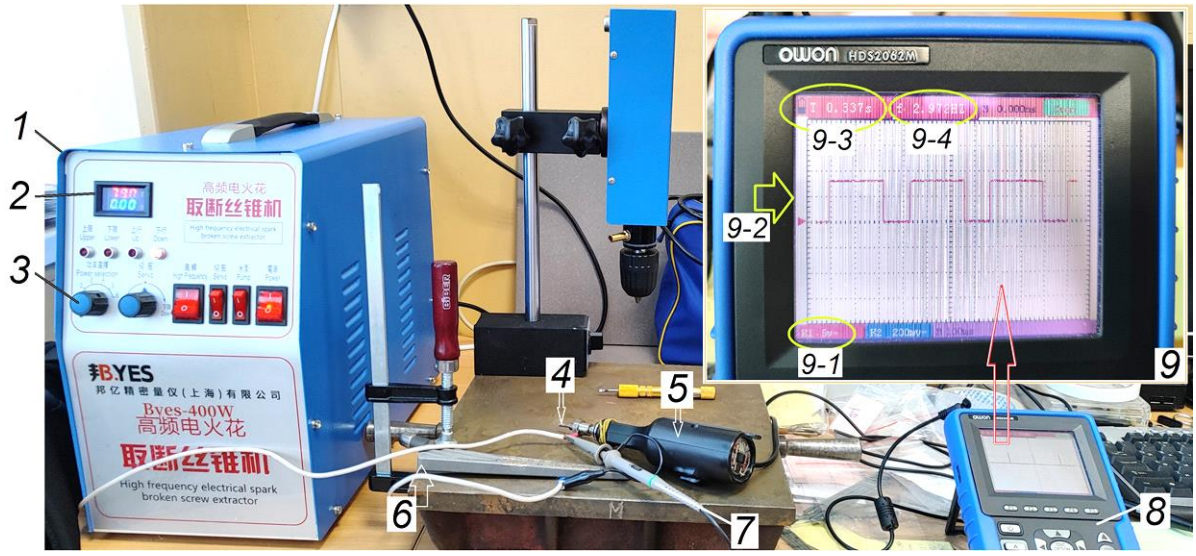


Рис. 1. Комплекс для электрофизической модификации металлоизделий и измерение параметров электрических импульсов с помощью осциллографа: 1 – корпус прибора; 2 – индикатор уровня напряжения; 3 – потенциометр для регулировки мощности; 4 – рабочий электрод (титановый); 5 – электромеханический генератор (осциллятор); 6 – металлоизделие (ножка титанового эндопротеза); 7 – измерительный щуп, позволяющий измерять напряжение в режимах «1×1» и «1×10»; 8 – двухканальный осциллограф «OWON HDS2062M»; 9 – монитор осциллографа, отражающий параметры цены большого деления подключенного канала «9-1», развертку сигнала во времени «9-2», длительность импульса «9-3» и частоту следования импульсов «9-4»

Напряжение *U* межэлектродного промежутка в разомкнутом состоянии («холостой ход») составило ~80 В (рис. 1, п. 2 и 9-2). Управление мощностью при электрофизической обработке осуществлялось с помощью регулировки скважностью *q* прямоугольных импульсов напряжения, изменяемой от 2,5 до 98 %, при этом частота следования импульсов *f* была постоянной ~3 Гц (Рис. 1, п. 2, 3, 9-3 и 9-4).

Изменение положения потенциометра п.*3* позволило осуществить плавное управление рабочим током *I* искровых разрядов, и в случае системы «титановый электрод-инструмент – титановый образец-диск» основной электротехнический параметр ЭИН изменялся от 0,2 до 1,4 А (табл. 1).

Процесс ЭИН может осуществляться как в «ручном», так и автоматизированном режимах обработки (рис. 2 а, б). Для образцов простой формы, в данном случае дисков, при отработке оптимальных параметров целе-

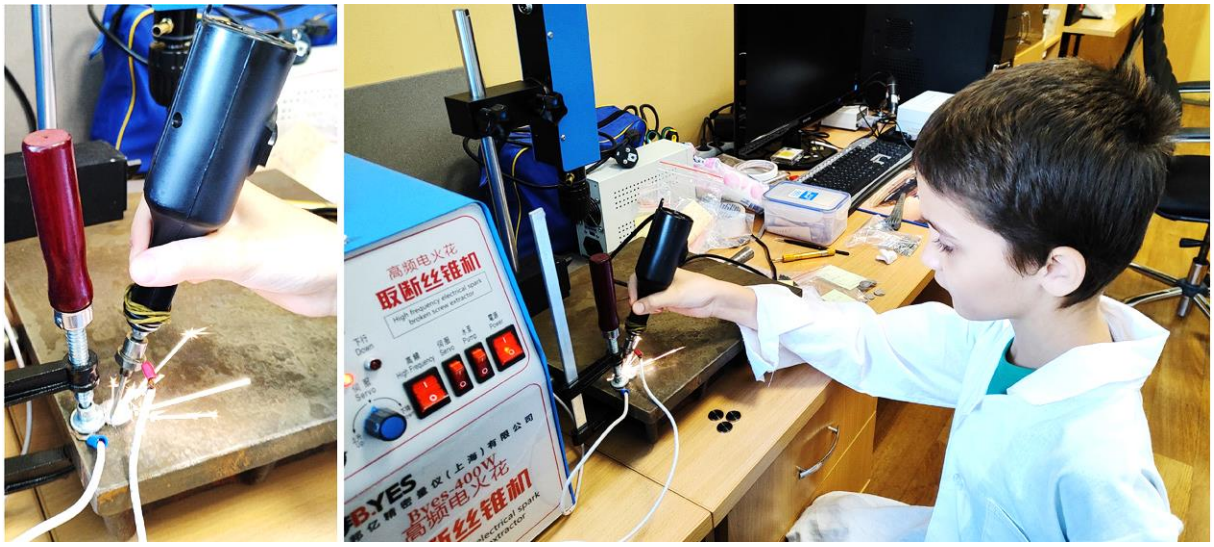
сообразно произвести отладку технологических параметров в ручном режиме (рис. 2 б, табл. 2).

Таблица 1

Электротехнические параметры комплекса
для электроискрового нанесения титановых покрытий (на обратной полярности)

Режим ЭИН	Рабочий ток *I*	Скважность *q*
–	А	%
«0»*	0,20 ± 0,05	2,5
«1»	0,40 ± 0,05	17,0
«2»	0,50 ± 0,05	28,3
«3»	0,60 ± 0,05	37,7
«4»	0,70 ± 0,05	47,1
«5»	1,10 ± 0,10	56,7
«6»	1,20 ± 0,10	67,1
«7»*	1,30 ± 0,10	83,2
«8»*	1,40 ± 0,10	98,3

Примечание: * – выполнена корректировка положения потенциометра (режимы «0», «7» и «8» не имеют заводской маркировки на передней панели устройства).



а б

Рис. 2. Процесс ЭИН титанового электрода-инструмента на поверхность титановых образцов-дисков: а – увеличенный фрагмент рабочей области; б – общий вид рабочего места оператора электрофизического комплекса для обработки металлоизделий

ЭИН покрытий имеет отличия при обработке на прямой («+» на электроде-инструменте, «–» на изделии) и обратной («–» на электроде-инструменте, «+» на изделии) полярности подключения выводов прибора в системе «электрод-инструмент – электрод-изделие». Согласно теоретическим представлениям температура катода («–») может отличаться по температуре до 1000 °С от противоположного электрода.

Таблица 2

Экспериментальные значения параметров электроискрового нанесения титановых покрытий (для оптимизации процесса)

№	Материал покрытия	Материал основы	Рабочий ток (режим «3»)	Полярность	Время нанесения
–	–	–	А	«+»/«–»	с
1-1	Ti	Ti	0,5 ± 0,1	«+»	120
1-2	Ti	Ti	0,6 ± 0,1	«–»	120
1-2*	Ti	Ti	0,6 ± 0,1	«–»	240
1-2**	Ti	Ti	0,6 ± 0,1	«–»	60

При исследовании образцов до и после ЭИН выполнялись измерения массы образцов (с точностью до 0,1 мг). Морфология поверхности, а именно наличие частиц нанесенного материала электрода-инструмента, равномерность их формы и перекрытие исследовались с помощью макроанализа на микроскопе «МБС-10» при увеличении от 2 до 20 крат. Параметры шероховатости определялись методом профилометрии, с применением цифрового анализатора с расчетом стандартных параметров среднего арифметического значения микровыступов и микровпадин *Ra*, разницы между 5 наибольшими микровыступами и 5 наименьшими микровпадинами *Rz*, наибольшей разницей между локальными выступами и впадинами *Rmax*, а также среднего шага микронеровностей *Sm*. Изменение механических свойств поверхности оценивалось с применением твердомера Роквелла по шкалам «B» (при нагрузке на индентор, равной 100 кгс) и «F» (при нагрузке на индентор, равной 60 кгс).

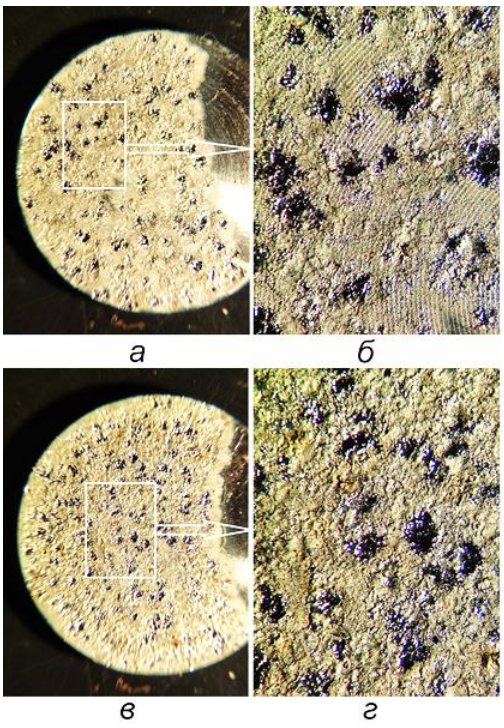


Рис. 3. Морфология поверхности титановых образцов-дисков с титановыми покрытиями, полученными при минимальной длительности обработки t = 120 с, скважности импульсов q = 2,5 % (*а*, *б*) и значении q = 37,7 % (*в*, *г*)

В результате ЭИН при минимальном токе (режим «0») полученное покрытие характеризовалось неоднородностью покрытия исходной поверхности образца (рис. 3а, б).

Увеличение тока способствовало увеличению массопереноса и устранению дефектов в виде «окон» в покрытии (рис. 3 в, г). Стабильные результаты по морфологии покрытий наблюдались начиная с тока 0,5-0,6 А (режимы «2, 3»), при этом увеличение тока более 0,7 А не способствовало эффективному массопереносу (табл. 1).

Начиная с тока 1,1 А и выше покрытие интенсивно взаимодействовало с кислородом и азотом воздуха, меняя свою окраску со светло-металлической на темно-коричневую (появление оксидной или оксинитридной пленки).

Для оптимизации процесса ЭИН был выбран режим «3» (при рабочем токе 0,5-0,6 А) на прямой (рис. 4 а, б) и обратной (рис. 4 в-з) полярности.

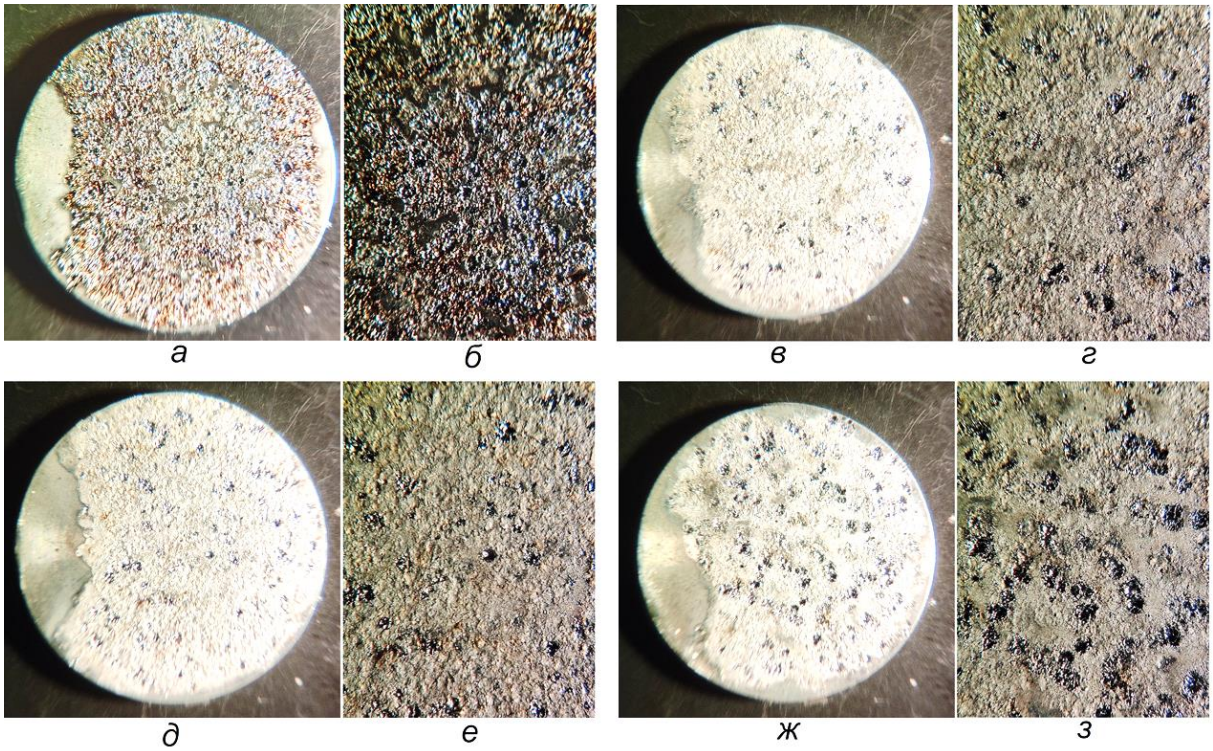


Рис. 4. Морфология поверхности титановых образцов-дисков с титановыми покрытиями, полученными при оптимальной скважности импульсов $q \approx 40$ %, различной полярности и длительности t обработки: а, б – прямая полярность, t = 120 с; в, г – обратная полярность, t = 120 с; д, е – обратная полярность, t = 240 с; ж, з – обратная полярность, t = 60 с

При длительности обработки t = 60 с титановое покрытие было тонким h около 20 мкм (отклонение от среднего не более 5 мкм) и имело множественные дефекты в виде отдельных крупных сплэтов (рис. 4 ж, з). При этом наиболее значимый параметр шероховатости был невысоким –

Ra ≈ 6 мкм и наблюдался наибольший перепад между выступами и впадинами – *Rmax* > 50 мкм (табл. 3, образец «1-2**»). Сглаживание микрорельефа также фиксировалось и при продолжительной обработке *t* = 240 с (образец «1-2*»), толщина ЭИН-покрытий не превышала *h* ≈ 20 мкм (рис. 4 д, е). Твердость указанных образцов была снижена – 110–114 HRF и 94-102 HRB соответственно.

Таблица 3

Экспериментальные данные гравиметрии, профилометрии и макроиндентирования по методу Роквелла для титановых образцов-дисков с ЭИН-покрытиями

№	Прирост массы образцов *Δm*	Толщина покрытия *h*	Параметры шероховатости				Твердость по Роквеллу, шкалы:	
			Ra	*Rz*	*Rmax*	*Sm*	HRF	HRB
–	мг	мкм	мкм	мкм	мкм	мкм	–	–
1-1	0,9	50	7,48±0,59	42,33±4,45	50,67±2,88	223±4	112±2	95±4
1-2	4,5	90	7,48±0,41	40,06±2,91	44,73±3,71	170±4	113±3	101±2
1-2*	2,3	20	7,25±0,39	40,00±4,08	45,00±3,88	170±12	111±1	98±2
1-2**	1,1	20	6,06±1,39	39,86±7,84	51,06±9,87	190±32	112±2	98±4

Оптимальные результаты соответствовали образцу «1-2», в частности толщина титанового ЭИН-покрытия составила *h* ≈ 90 мкм (максимальный прирост массы *Δm* = 4,5 мг), *Ra* составил ~7,5 мкм при минимальном перепаде микрорельефа *Rmax* ≈ 41–48 мкм, а также при наибольшей твердости – 110-116 HRF и 99-103 HRB, соответственно (рис. 4 в, г). Изменение полярности с обратной на прямую способствовало снижению производительности процесса, а именно толщина снизилась практически вдвое и составила *h* ≈ 50 мкм, окислению поверхности и снижению твердости при наибольшей нагрузке – 91-99 HRB (рис. 4 а, б; образец «1-1»).

Таким образом, в результате ЭИН титана на поверхность титановых образцов-дисков установлено, что наиболее эффективный массоперенос наблюдался при средней величине рабочего тока *I* = 0,5-0,6 А (скважность импульсов *q* ≈ 40 %, режим «3») на обратной полярности. Толщина титановых покрытий достигала до 90 мкм при длительности ЭИН около *t* = 120 с, при этом достигались оптимальные параметры шероховатости *Ra* ≈ 7,5 мкм (остальные параметры: *Rz* ≈ 40 мкм, *Rmax* ≈ 45 мкм и *Sm* ≈ 170 мкм) и высокие значения твердости 110-116 HRF и 99-103 HRB (230-260 HV), что в абсолютных значениях соответствует 2,26-2,55 ГПа. Полученные шероховатые и пористые титановые ЭИН-покрытия могут использоваться для направленной структурной модификации имплантатов,

металлических компонентов эндопротезов и других тканеинженерных конструкций для восстановительной медицины.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00542, https://rscf.ru/project/24-29-00542/

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фомин А.А. Инженерия поверхности функциональных материалов и численное моделирование физических процессов при индукционной обработке металлов: учеб. пособие для студ. направлений подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» (магистратура), 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии», 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии» (магистратура) / Сарат. гос. техн. ун-т им. Гагарина Ю.А. Саратов: СГТУ, 2020. 91 с.

2. Фомин А.А. Плазменное напыление порошковых покрытий и электротермическая обработка титановых изделий: учеб. пособие для студ. направлений подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» (магистратура), 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии», 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии» (магистратура). Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. Саратов: СГТУ, 2021. 108 с.

3. Фомина М.А., Кошуро В.А., Фомин А.А. Индукционно-термическая обработка танталсодержащего покрытия, сформированного на техническом титане электроискровым легированием // Вестник Московского энергетического института // Вестник МЭИ. 2023. № 5. С. 35-47.

ВЛАДИМИР МАРКОВИЧ ТАРАН: УЧЁНЫЙ, ПЕДАГОГ, АКТИВНЫЙ УЧАСТНИК НАУЧНОЙ ШКОЛЫ В ОБЛАСТИ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В плеяде выдающихся ученых Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. почетное место занимает доктор технических наук, профессор Владимир Маркович Таран. Его многолетняя и плодотворная деятельность является ярким примером беззаветного служения науке и высшему образованию, сочетающего фундаментальные исследования, прикладные разработки и подготовку высококвалифицированных инженерных и научных кадров.

Рис. 1. Владимир Маркович Таран

Становление ученого

Владимир Маркович родился в 1937 году в селе Куйбышево Куйбышевского района Запорожской области. В 1957 году после окончания Славянского технического училища был призван в ряды Советской Армии, где проходил службу в течение трех лет. Профессиональный путь Владимира Марковича начался в стенах одного из технических вузов СССР – Харьковского института радиоэлектроники. Окончив его в 1966 году по специальности «Промышленная электроника», он получил прочный фундамент знаний, который позволил ему успешно заниматься как научной, так и педагогической деятельностью.

После окончания вуза Владимир Маркович назначен на должность инженера Саратовского научно-исследовательского института машиностроения, где благодаря упорному труду и проявленным качествам в последующем занял должность начальника лаборатории. Владимир Марко-

вич был удостоен нескольких благодарностей, награжден знаком «Победитель соцсоревнования» в 1976 и 1977 гг.

В 1993 году судьба привела его в Саратовский политехнический институт, где его талант ученого и педагога раскрылся в полной мере. Начав работу в должности доцента, он быстро проявил себя как один из ведущих специалистов и впоследствии был удостоен звания профессора.

Научная деятельность и ключевые достижения

Основное направление научных исследований профессора Тарана В.М. связано с крайне важной и технологически сложной областью, а именно разработкой и автоматизацией технологического оборудования для нанесения покрытий, в частности методом плазменного напыления.

Результатом многолетнего кропотливого труда стали свыше 140 научных публикаций, среди которых 2 фундаментальные монографии, обобщающие огромный экспериментальный и теоретический опыт, и 8 учебных пособий, активно используемых студентами и аспирантами не только СГТУ имени Гагарина Ю.А., но и других технических вузов страны.

Педагогическое наследие и научная школа

Но истинным богатством любого ученого-педагога являются его ученики. Владимир Маркович Таран воспитал целую плеяду талантливых ученых, инженеров и кандидатов наук, которые сегодня успешно продолжают его дело в стенах Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. и на промышленных предприятиях региона и страны. Под его руководством защищено множество выпускных работ, а его советы и консультации помогли сформироваться не одному поколению материаловедов и специалистов в области биомедицинской инженерии.

Работая на кафедре «Материаловедение и биомедицинская инженерия», профессор Таран В.М. сумел органично соединить глубокие знания в области физики плазмы и автоматизации с современными требованиями медицины, внеся значительный вклад в развитие направления создания биосовместимых покрытий для имплантатов.

Заключение

Профессор Владимир Маркович Таран остается одним из столпов научно-педагогического сообщества СГТУ имени Гагарина Ю.А. Его работы в области плазменных технологий и автоматизации производственных процессов получили широкое признание среди специалистов. А его главное достижение – переданные знания ученикам, которые гарантируют, что дело его жизни будет продолжено и приумножено новыми поколениями исследователей.

Его жизнь и карьера – это образец глубокой преданности науке, высочайшего профессионализма и неиссякаемой энергии, направленной на развитие отечественного образования и технологий.

ИТОГИ IV ВСЕРОССИЙСКОЙ МОЛОДЕЖНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ»

А.А. Фомин

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

IV Всероссийская молодежная конференция «Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки» по сложившейся традиции прошла в конце весны в Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. на базе кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» в дистанционном формате и выборочно в виде очного семинара. Конференция задумана как ежегодное отчетное мероприятие для студентов направлений подготовки «Материаловедение и технологии материалов» (МВТМ) и «Биотехнические системы и технологии» (БИСТ), а также аспирантов, обучающихся по научным специальностям 2.6.1 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» и 1.1.10 «Биомеханика и биоинженерия». Основной задачей конференции является также представление и обсуждение актуальных научных результатов фундаментальных исследований и практических достижений в области материаловедения, металловедения, нанотехнологий, медицинской техники и высокоэффективных процессов электротермической и электрофизической обработки конструкционных и функциональных материалов.

В этом году география организаций-участников осталась достаточно большой и включила в себя свыше 20 университетов и академических институтов со всей России. Достижения фундаментальной и прикладной науки представили:

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (г. Москва) – представлена методика компьютерного моделирования формообразования винтовых поверхностей дисковым инструментом;

Южный федеральный университет (г. Ростов-на-Дону) – приведены результаты исследования атомного строения двух типов MXene-фаз, различающихся составом и структурой слоев; изучены твердые растворы феррита висмута;

Институт катализа им. Борескова СО РАН, Новосибирский государственный технический университет, (г. Новосибирск), в том числе в сотрудничестве с *Институтом органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН (г. Москва)* – выявлены перспективы культивирования микроводорослей как источника ценного углеводного сырья; исследован процесс жид-

кофазного пероксидного окисления фенола в присутствии катализаторов; изучена реакция синтеза органических карбонатов;

Сибирский федеральный университет (г. Красноярск) – показана возможность получения прозрачных бесцветных стекол; рассмотрены основные способы синтеза германата висмута; изучены материалы на основе ZrO_2, приготовленных методом СВЧ обработки;

Пензенский государственный университет (г. Пенза) – получены МДО покрытия при различных параметрах и выявлена зависимость получаемых свойств от исходных параметров; изучены технологии бронирования военной техники с применением алюминиевых сплавов;

Пензенский колледж информационных и промышленных технологий (ИТ-колледж) (г. Пенза) – выполнен анализ современных и перспективных способов повышения стабильности горения дуги и обеспечения управляемого переноса электродного металла в сварочную ванну при механизированной сварке плавящимся электродом;

Кубанский государственный университет (г. Краснодар) – представлены результаты моделирования внутреннего электрического поля кремниевых наноструктур с высокоомной базой; исследовано влияние параметров УФ-излучения на процесс кавитационно-диффузионного синтеза наночастиц серебра; представлена комплексная оценка влияния гелевых композиций на формирование нанокластеров серебра различного размера;

Тульский государственный университет (г. Тула) – изучено влияние режимов FDM-печати на физико-механические свойства полимерных изделий; разработана и изготовлена оснастка для роботизированного комплекса;

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (г. Пермь) – исследовано влияние двух- и трехкомпонентных фаз, образующихся в процессе формирования системы Zr-Al-N импульсным магнетронным распылением;

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород) – изучен новый проводниковый сплав Al-вес.% 0,26Zr и тонкая проволока из него, обладающая повышенными механическими свойствами и термической стабильностью зеренной структуры;

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (г. Новочеркасск) – представлены результаты моделирования эксперимента по коагулированию жидких отходов;

Уфимский университет науки и технологий (г. Уфа) – рассмотрено влияние ультрафиолетового излучения на физико-механические свойства композитов, созданных на основе термостойких полимеров с добавлением неорганических наполнителей;

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (г. Санкт-Петербург) – сделана попытка связать максимумы пла-

стичности с превращением в железе, на что указывают тепловые эффекты и аномалии его свойств;

Челябинский государственный университет (г. Челябинск) – рассмотрено изменение фазового состава при термообработке полититаната калия, модифицированного солями марганца и хрома;

Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж) – разработаны покрытия на базе рутилового пигмента;

Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева (г. Москва) – исследована способность смешанных метанотрофных сообществ синтезировать наночастицы серебра, проведен анализ их характеристик и антимикробных свойств; исследован щелочной бесцианидный электролит на основе оксиэтилендифосфоновой кислоты для электрохимического осаждения меди на сталь;

Томский политехнический университет (г. Томск) – разработано биоинертное покрытие, предотвращающее развитие у пациентов аллергических реакций на титановые сплавы; изучено влияние термообработки на механические свойства высокоэнтропийного сплава AlFeNiCoCrNb0,25;

Саратовский государственный университет имени Чернышевского Н.Г. (г. Саратов) – изучено синергетическое взаимодействие между полианилином и углеродными нанотрубками в пленках; разработана волноводная система для измерения диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков в X-диапазоне частот; исследовано влияние металлической пластины на частотные зависимости коэффициентов пропускания полосно-пропускающего фильтра в X-диапазоне частот; проведено исследование процесса загрузки родамина Б в нановолокна поликапролактона.

Результаты аналитических исследований также представили: *Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске (г. Смоленск), Тамбовский государственный технический университет (г. Тамбов)*.

Ученые *СГТУ имени Гагарина Ю.А.* представили результаты передовых исследований в направлениях:

– модифицирования полититаната калия различными солями трехвалентного железа; рассмотрена фотокаталитическая активность ожелезненного полититаната калия в модельной системе почва-бензин (кафедра «Химия и химическая технология материалов»);

– макетирования устройств: привода позиционирования БПЛА с применением аддитивных технологий, захвата и перемещения аккумулятора БПЛА и фиксатора АКБ БПЛА (кафедра «Системотехника и управление в технических системах»).

В свою очередь ученые и молодые исследователи кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» *СГТУ имени Гагарина Ю.А.* представили следующие результаты:

– выполнен анализ воздействия нагрузки на имплантат титановой пластины голени для остеосинтеза; проведен анализ различных вариаций материалов для изготовления оконных сеток; проведены расчеты параметров поршня двигателя для работы на водороде; проведен анализ надежности и устойчивости к деформациям различных материалов, применяемых для изготовления ножей; представлено исследование влияния ультрафиолетового излучения на механические и физико-химические свойства резиновых изделий; рассмотрена полиуретановая (антигравийная) пленка как средство защиты лакокрасочного покрытия автомобиля; проведен анализ различных алюминиевых сплавов для изготовления поршней двигателей внутреннего сгорания; приводится методика плазменного напыления порошка карбида кремния на титан; проведен анализ биогенного Ti,Ca-гидроксиапатита;

– рассмотрена возможность формирования металлокерамического переходного подслоя посредством импульсной лазерной обработки с повышенными физико-механическими свойствами перед последующим нанесением боридных слоев;

– предложена комбинированная технология получения биосовместимого покрытия на титановой основе, включающая плазменное напыление порошка гидроксиапатита (ГА) и последующую ультразвуковую пропитку суспензией порошка оксида магния; проведен синтез и подтверждена структура биогенного Ti,Ca-ГА; проведено исследование влияния параметров предварительной обработки поверхности титана на адгезию напыляемого ГА покрытия;

– предложена технология борирования стали Х12МФ для повышения эксплуатационных характеристик хирургических инструментов; изучено влияние температуры и длительности нагрева во время полного отжига стали 20Х23Н18 и сплава ХН65МВУ, используемых в качестве материала для изготовления стеклоформующей оснастки; рассмотрено влияние материала катода на электрические и емкостные характеристики плоского титанового ионистора, обратимо работающего по водороду; представлен комплексный анализ современных методов упрочнения поверхности медицинских инструментов, изготавливаемых из стали Х12МФ;

– построена модель и разработан имплантат со штоком из технически чистого титана;

– изучено влияние химико-термической обработки на улучшение механических характеристик и биосовместимости титановых изделий медицинского назначения;

– представлены результаты экспериментального исследования осадки циркония марки Э110, изучено изменение структуры и физико-механических свойств;

– изучены процессы массопереноса титановых электродов-инструментов при электроискровом нанесении пористых покрытий на титановые образцы-диски.

Стоит отметить, что уже не первый год к данному формату конференции проявляют интерес не только молодые ученые, научные руководители и научные сотрудники из университетов и академических институтов, но и муниципальные организации среднего образования, в том числе г. Саратова. Учащиеся готовят проекты и представляют свои научные работы, в том числе в виде статей для сборника конференции, в соавторстве с учителями школ, молодыми учеными, аспирантами и научно-педагогическими работниками высшей школы.

Научное издание

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ

Сборник научных трудов
по материалам IV Всероссийской молодежной конференции

Редактор Л.А. Скворцова

Компьютерная верстка Т.В. Семеновой

Подписано в печать 15.09.2025 Формат 60×84 1/16
Бум. офсет. Усл. печ. л. 17,25 Уч.-изд. л. 16,0
Тираж 100 экз. Заказ 39 С 15
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Отпечатано в Издательстве СГТУ имени Гагарина Ю.А.
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Тел.: 8 (8452) 99-87-39, e-mail: izdat@sstu.ru