

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Факультет
промышленных технологий,
электроэнергетики и
транспорта
(наименование)

Кафедра
«Сварочное, литейное
производство и материаловедение»
(наименование)

Направление подготовки

22.04.01 «Материаловедение и
технологии материалов»
(код и наименование)

Профиль

«Материаловедение и технологии
новых материалов»
(наименование)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему

«Исследование структуры и свойств отливок, полученных
методом литья по выжигаемым моделям»

Студент

Ку 24.06.23
(подпись, дата)

Куранов
Андрей
Сергеевич
(ф.и.о. полностью)

Научный руководитель
к.т.н., доцент

Лог 24.06.23
(подпись, дата)

Логинов О.Н.
(фамилия, инициалы)

Рецензент
к.т.н., инженер-технолог
АО ФНПЦ «ПО «Старт»
им.М.В. Проценко»

Ч 24.06.23
(подпись, дата)

Чижова Е.В.
(фамилия, инициалы)

Нормоконтролёр
к.т.н., доцент

Хор 24.06.23
(подпись, дата)

Хорин А.В.
(фамилия, инициалы)

Работа допущена к защите (протокол заседания кафедры от 07.06.2023 № 10)

Заведующий кафедрой

Лог 25.06.23
(подпись, дата)

Логинов О.Н.
(фамилия, инициалы)

Работа защищена с отметкой отлично (протокол заседания ГЭК от 26.06.2023 № 4)

Секретарь ГЭК
к.т.н., доцент

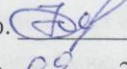
Гус 26.06.2023
(подпись, дата)

Гуськов М.С.
(фамилия, инициалы)

Пенза, 2023

ФГБОУ ВО «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ФАКУЛЬТЕТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И
ТРАНСПОРТА
КАФЕДРА «СВАРОЧНОЕ, ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»

«Утверждаю»

Заведующий кафедрой СЛП и М
д.т.н., проф.  А.Е. Розен
«27» 09 2021 г.

ЗАДАНИЕ

на магистерскую диссертацию

Студента гр. 21МТм1 Факультета промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта Политехнического института ПГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

Куранова Андрея Сергеевича

Научный руководитель магистерской диссертации: к.т.н., доцент Логинов О.Н.

Время выполнения магистерской диссертации: с 01.09.2021 г. по 7.06.2023 г.

Место преддипломной практики: Пензенский государственный университет, кафедра «Контроль и испытание материалов», технопарк Яблочков

Тема работы: «Исследование структуры и свойств отливок, полученных методом литья по выжигаемым моделям».

Тема утверждена приказом ректора ПГУ № 768/о от «24» сентября 2021 г.

Техническое задание на работу (назначение устройства, условия применения, внешние воздействия, специальные требования и т.п.): *произвести разработку комбинированной технологии литья по выжигаемым моделям и исследование микроструктуры, твердость и ударную вязкость полученных отливок из стали 35Л после регламентируемой термообработки.*

Объем и содержание основной части магистерской диссертации

Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, расчетов, обоснований, описаний):

- введение с обоснованием актуальности темы исследования, установления объекта исследования и предмета, постановкой цели и задачи исследования;
- теоретический раздел – изучение технологий получения отливок с применением технологий литья по выплавляемым и выжигаемым моделям;
- произвести обоснование выбора материалов для получения выжигаемых моделей изделия, получаемых 3D печатью;
- описание разрабатываемой технологии литья;

- экспериментальный раздел – описание результатов исследований;
- заключение – основные выводы и обоснования по теме работы и полученным результатам.

Презентация магистерской диссертации (перечень и содержание слайдов презентации):

– тема магистерской диссертации	1 л А4;
– актуальность работы	1 л А4;
– цели и задачи магистерской диссертации	1 л А4;
– обоснование выбора модельных материалов	1 л А4;
– схема комбинированной технологии литья	2 л А4;
– визуальный контроль качества отливок	1 л А4;
– модернизация литниковой системы	1 л А4;
– получение качественных отливок	1 л А4;
– оборудование и результаты химического анализа	1 л А4;
– оборудование и результаты механических испытаний	3 л А4;
– результаты исследования микроструктуры	1 л А4;
– выводы по работе	1 л А4.

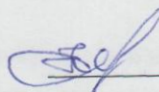
Рекомендуемая литература:

1. Григорьев, В.М. Литье по выжигаемым моделям: учебно-методическое пособие / В.М. Григорьев - Хабаровск: Изд-во Хабаровского государственного технологического университета, 2002. - 58 с.
2. Андрианов, П.А. Литье стали по выжигаемым аддитивным моделям / П.А. Андрианов, А.Е. Колмаков, М.М. Уткин // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2019. № 4. - С.436-443.
3. ГОСТ 977-1988 Отливки из стали. Общие технические условия. - М.:Изд-во стандартов, 1988. - 36с.

Дата выдачи задания: 27.09.2021 г.

Научный руководитель магистерской диссертации:

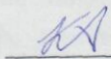
к.т.н., доцент каф. «СЛПиМ»

 О.Н. Логинов

Задание к исполнению проверил:

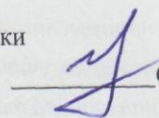
студент гр. 19МТм1

27 сентября 2021 г.

 А.С. Куранов

Магистерскую диссертацию к защите допустить

Декан факультета промышленных технологий, электроэнергетики
и транспорта Пензенского государственного университета

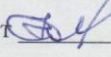
 С.Ю. Киреев

ОПОП освоена в полном объеме.
К государственной итоговой
аттестации допустить

ФГБОУ ВО «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ФАКУЛЬТЕТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И
ТРАНСПОРТА
Кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

«Утверждаю»

Руководитель ВКР

к.т.н., доцент  О.Н. Логинов

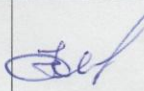
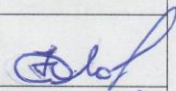
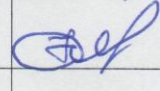
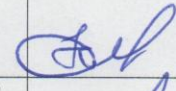
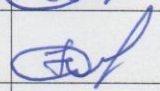
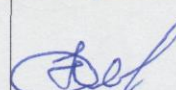
« 27 » сентября 2021 г.

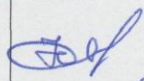
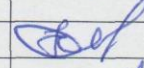
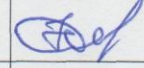
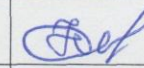
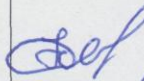
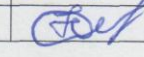
КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН
на магистерскую диссертацию

Магистранту гр. 21МТм1 Факультета промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта Политехнического института ПГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

Куранову Андрею Сергеевичу

Тема работы: «Исследование структуры и свойств отливок, полученных методом литья по выжигаемым моделям».

Наименование этапа работы	Срок исполнения		Отметка о выполнении
	начало	окончание	
1 Получение задания, его уяснение, беседа с руководителем. Подготовка к выполнению магистерской диссертации.	27.09.21	14.10.21	
2 Подбор и изучение рекомендованной литературы.	15.10.21	30.12.21	
3 Изучение объекта исследования, постановка цели и задачи работы. Написание введения.	31.12.21	02.02.22	
4 Литературный и патентный поиск по исследованию. Обзор и оценка инновационных технологий литья по выплавляемым и выжигаемым моделям, аддитивным технологиям.	03.02.22	25.03.22	
5 Обоснование выбора материалов и технологии изготовления моделей и литниковой системы	26.03.22	24.05.22	
6 Отработка технологии изготовления качественных стальных отливок и изготовление опытной партии	25.05.22	01.09.22	

7 Экспериментальная часть работы. Исследование структуры и механических свойств стальных отливок.	02.09.22	03.02.23	
8 Завершение оформления ПЗ.	04.02.23	31.05.23	
9 Представление магистерской диссертации на просмотр и проверку на плагиат.	01.06.23	13.06.23	
10 Предварительная защита магистерской диссертации	04.06.23	15.06.23	
11 Полное завершение всех работ, представление завершенной магистерской диссертации нормоконтролю и представление зав. кафедрой на подпись пояснительной записки (совместно с протоколом проверки на плагиат и отзывом руководителя).	13.06.23	23.06.23	
12 Защита магистерской диссертации.	23.06.23	07.07.23	

Прохождение каждого этапа подготовки магистерской диссертации подтверждается подписью руководителя.

Студент учебной группы 21МТм1  А.С. Куранов

«27» сентября 2021 г.

Ректору Пензенского государственного
университета

А. Д. Гулякову

от студента 2 курса ФПТЭТ очной
формы обучения

Куранова Андрея Сергеевича

(фамилия, имя, отчество)

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Куранов Андрей Сергеевич, студент 2 курса очной формы обучения направления магистерской подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат» магистерской диссертации на тему: *«Исследование структуры и свойств отливок, полученных методом литья по выжигаемым моделям»*, выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также из защищенных ранее выпускных квалификационных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Я ознакомлен с действующим Стандартом университета «Выпускная квалификационная работа обучающихся по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры», согласно которому обнаружение плагиата является основанием для недопуска ВКР к защите.


(подпись студента)

21.06.2023

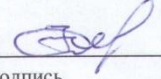
(дата)

ВКР представлена на проверку

21.06.2023

(дата)

Руководитель ВКР


Подпись

О.А. Логинов

И.О.Фамилия



АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

СПРАВКА

Пензенский государственный университет

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Куранов Андрей Сергеевич
Самоцитирование
рассчитано для: Куранов Андрей Сергеевич
Название работы: Магистерская диссертация на тему: «Исследование структуры и свойств отливок, полученных методом литья по выжигаемым моделям»
Тип работы: Магистерская диссертация
Подразделение: кафедра "Сварочное, литейное производство и материаловедение"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ: НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	22.76%	СОВПАДЕНИЯ	22.76%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	66.4%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	66.4%
ЦИТИРОВАНИЯ	10.84%	ЦИТИРОВАНИЯ	10.84%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 22.06.2023

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 22.06.2023 14:31

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.1-63, библиография с.64-66
Модули поиска: ИПС Адилет; Библиография; Сводная коллекция ЭБС; Интернет Плюс*; Сводная коллекция РГБ; Цитирование; Переводные заимствования (RuEn); Переводные заимствования по eLIBRARY.RU (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Переводные заимствования по Интернету (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования издательства Wiley; eLIBRARY.RU; СПС ГАРАНТ: аналитика; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; IEEE; Медицина; Диссертации НББ; Коллекция НБУ; Перефразирования по eLIBRARY.RU; Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Перефразирования по Интернету; Перефразирования по Интернету (EN); Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Перефразирования по коллекции

Работу проверил: Логинов Олег Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи: 22.06.2023

Подпись проверяющего



Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR-код,
который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях.

Протокол

проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» магистерской диссертации на тему: «Исследование структуры и свойств отливок, полученных методом литья по выжигаемым моделям».

студента группы 21МТм1 Куранова Андрея Сергеевича

(И.О. Фамилия)

направления подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»,
профиль «Материаловедение и технологии новых материалов».

Руководитель магистерской диссертации Логинов Олег Николаевич к.т.н., доцент
каф. «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

Результат проверки на плагиат магистерской диссертации Куранова Андрея Сергеевича составляет 66,4 % оригинальности, что соответствует существующим требованиям стандарта СТО ПГУ 3.12-2018. Магистерская диссертация может быть рекомендована к защите.



СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Пензенский государственный университет

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Куранов Андрей Сергеевич
Самоцитирование
рассчитано для: Куранов Андрей Сергеевич
Название работы: Магистерская диссертация на тему: «Исследование структуры и свойств отливок, полученных методом литья по выжигаемым моделям»
Тип работы: Магистерская диссертация
Подразделение: кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ: НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	22.76%	СОВПАДЕНИЯ	22.76%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	66.4%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	66.4%
ЦИТИРОВАНИЯ	10.84%	ЦИТИРОВАНИЯ	10.84%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 22.06.2023

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 22.06.2023 14:31

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.1-63, библиография с.64-66
Модули поиска: ИПС Адилет; Библиография; Сводная коллекция ЭБС; Интернет Плюс; Сводная коллекция ПГУ; Цитирование; Переводные заимствования (RuEn); Переводные заимствования по eLIBRARY.RU (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Переводные заимствования по Интернету (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования издательства Wiley; eLIBRARY.RU; СПС ГАРАНТ: аналитика; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; IEEE. Медицина; Диссертации НББ; Коллекция НБУ; Перефразирования по eLIBRARY.RU; Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Перефразирования по Интернету; Перефразирования по Интернету (EN); Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Перефразирования по коллекции

Работу проверил: Логинов Олег Николаевич

ФМО проверяющего

(дата)

22.06.23

(И.О. Фамилия руководителя ВКР)

О.Н.Логинов

РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию

Куранова Андрея Сергеевича

«Исследование структуры и свойств отливок, полученных методом литья по выжигаемым моделям», представленной на соискание степени магистра по направлению подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» (профиль – «Материаловедение и технологии новых материалов»)

Комбинированная технология литья, сочетает в себе изготовление выжигаемых моделей отливок по *FDM*-технологии с изготовлением элементов ЛПС из легкоплавкой смеси, в условиях единичного и мелкосерийного производства на предприятиях имеет ряд преимуществ перед традиционной технологией производства, а именно:

- отсутствие необходимости изготовления дорогостоящей оснастки;
- снижение себестоимости изделий;
- возможность изготовления сложных по конфигурации отливок.

Представленная на рецензию магистерская диссертация состоит из пояснительной записки на 67 листов.

Магистерская диссертация Куранова А.С. выполнена в соответствии с заданием и содержит следующие разделы: введение; литературно-патентный обзор технологии литья по выжигаемым моделям; оборудование, используемое при отработке технологии литья по выжигаемым моделям; материалы, используемые при отработке технологии литья по выжигаемым моделям; технология производства отливок из стали 35Л методом литья по выжигаемым моделям; заключение.

В диссертации рассматривается комбинированная технология литья с применением выжигаемых моделей отливок, изготовленных по *FDM*-технологии, и выплавляемых моделей литниково-питающей системы, изготовленных по традиционной технологии в пресс-формах. Осуществлен выбор материала для 3D-печати моделей отливок по *FDM*-технологии.

Отработана технология изготовления моделей литниковой-питающей системы из легкоплавкой смеси, а также технология изготовления керамических форм. Получена опытная партия отливок из стали 35Л. Исследован химический состав и механические свойства стали 35Л. Приведен микроструктурный анализ стали 35Л после нормализации и отпуска. Проведенные исследования показывают, что свойства полученных отливок соответствуют требованиям технической документации, а разработанная комбинированная технология может быть рекомендована к внедрению в условиях единичного или мелкосерийного производства.

В качестве замечания следует отметить, что автору следовало более подробно показать экономическую и производственную целесообразность применения разработанной комбинированной технологии литья в сравнении с классическими технологиями, например получение легкоплавкой модели в силиконовые формы и последующего литья по выплавляемым моделям.

В целом, диссертация Куранова А.С. выполнена на требуемом уровне, соответствует заданию, содержит необходимый материал по выбранной теме. Считаю, что магистерская диссертация может быть допущена к защите в ГЭК, а ее автор заслуживает присвоения степени магистра по направлению подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» (профиль – «Материаловедение и технологии новых материалов»).

Инженер-технолог АО «ФНПЦ

«ПО «Старт» им. М.В. Проценко», К.Т.Н.

Чижова Е.В.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Пензенский государственный университет»

ОТЗЫВ

РУКОВОДИТЕЛЯ МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Студент: Куранов Андрей Сергеевич

Тема: «Исследование структуры и свойств отливок, полученных методом
литья по выжигаемым моделям».

Направление подготовки – 22.04.01 «Материаловедение и технологии
материалов».

Профиль подготовки – «Материаловедение и технологии новых материалов».

Целью работы является разработка комбинированной технологии литья
с применением выжигаемых моделей отливок, изготовленных по FDM-
технологии, и выплавляемых моделей литниково-питающей системы,
изготовленных по традиционной технологии в пресс-формах.

В работе предложена и апробирована комбинированная технология
литья с применением выжигаемых моделей отливок, изготовленных по FDM-
технологии, и выплавляемых моделей литниково-питающей системы,
изготовленных по традиционной технологии в пресс-формах.

Обосновывается выбор материала пластика для изготовления модели
отливки и приводятся результаты исследования полноты сгорания и
зольности ABS и PLA пластиков как наиболее распространенных для 3D
печати.

Особенностью магистерской диссертации является то, что
предложенная комбинированная технология литья прошла апробацию, по
результатам которой литниково-питающая система была изменена и
дополнена воздушными каналами и выпорами для улучшения удаления
несгоревшей массы полимеров и продуктов сгорания. С учетом

вышеуказанных изменений в технологическом процессе, методом литья по выжигаемым моделям, получены опытные отливки из стали 35Л. Дальнейшие исследования отливок показали, что их качество, механические свойства и структура соответствует требованиям заказчика.

Таким образом, в работе разработана комбинированная технология изготовления литых заготовок, которая может быть рекомендована к внедрению в производство при реализации задач быстрого прототипирования, единичного или мелкосерийного производства.

Куранов А.С. относится к числу дисциплинированных магистров, умеющих планировать время выполнения работы и способных самостоятельно принимать рациональные инженерные решения. Отличается спокойным и уравновешенным характером, пользуется уважением среди однокурсников и преподавателей.

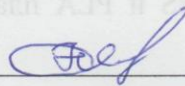
За время выполнения магистерской диссертации Куранов А.С. показал себя технически грамотным магистром, обладающим современными методами решения профессиональных задач.

Выполненная работа соответствует требованиям, предъявленным к магистерской диссертации.

Считаю, что магистерская диссертация может быть допущена к защите в ГЭК, а ее автор Куранов А.С. заслуживает присвоения степени магистра по направления 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» и профилю подготовки «Материаловедение и технологии новых материалов».

Отзыв составил доцент каф. «СЛПиМ»

ФГБОУ ВО «ПГУ» к. т. н., доцент



Логинов О.Н.

Оглавление

Введение.....	4
1 Литературно-патентный обзор технологии литья по выжигаемым моделям.....	6
1.1 Литературный обзор технологии литья по выжигаемым моделям .	7
1.2 Патентный обзор технологии литья по выжигаемым моделям	10
2 Оборудование, используемое при отработке технологии литья по выжигаемым моделям	15
2.1 Оборудование для печати по <i>FDM</i> -технологии	15
2.2 Оборудование для подготовки образцов.....	16
2.3 Оборудование для анализа химического состава.....	18
2.4 Оборудование для испытаний на растяжение	19
2.5 Оборудование для испытаний на ударную вязкость.....	21
2.6 Оборудование для исследования микроструктуры.....	22
2.7 Оборудование для нагрева и термообработки черных металлов ..	23
2.7.1 Печь камерного типа ПКМ 12.22.7/11М.....	23
2.7.2 Электродпечь сопротивления СНО 3.6.2/10И2	26
3 Материалы, используемые при отработке технологии литья по выжигаемым моделям.....	28
3.1 Нелегированная литейная сталь 35Л	28
3.2 Расходные материалы для печати по <i>FDM</i> -технологии	30
4 Технология производства отливок из стали 35Л методом литья по выжигаемым моделям	33
4.1 Проектирование 3D-моделей отливок в <i>SolidWorks</i>	33
4.2 Изготовление моделей отливок по <i>FDM</i> -технологии.....	34
4.2.1 Недостатки 3D-печати по <i>FDM</i> -технологии.....	35
4.2.2 Выбор материала для печати по <i>FDM</i> -технологии	36
4.3 Изготовление моделей ЛПС из легкоплавкой смеси.....	37

4.4 Сборка модельных блоков.....	39
4.5 Технология изготовления керамических форм	40
3.5.1 Подготовка кварцевого песка	40
3.5.2 Приготовление суспензии	41
3.5.3 Изготовление керамических форм	42
3.5.4 Контроль качества керамических форм.....	43
3.5.5 Выжигание полимерных моделей из керамических форм..	44
4.6 Процесс литья стали 35Л, контроль качества, термическая и меха- ническая обработка отливок.....	45
4.6.1 Заливка форм, выбивка, очистка отливок	45
4.6.2 Визуальный контроль качества отливок.....	48
4.6.3 Механическая и термическая обработка отливок.....	50
4.7 Анализ химического состава образцов из стали 35Л.....	52
4.8 Определение механических свойств стали 35Л	53
4.8.1 Подготовка стальных образцов для механических испы- таний	53
4.8.2 Определение механических свойств стали 35Л	55
4.9 Анализ микроструктуры стали 35Л	58
4.9.1 Подготовка микрошлифа для исследования микрострук- туры стали 35Л	58
4.9.2 Получение изображений микроструктуры поверхности стали 35Л.....	58
Заключение	60
Список сокращений и условных обозначений.....	62
Список литературы	63
Приложения	67

Введение

Литье по выжигаемым моделям [1] – одна из разновидностей точного литья. Технология применяется при изготовлении ответственных деталей в наукоемких отраслях промышленности (авиакосмической, судостроительной, оборонной, автомобильной и прочее). Внедрение аддитивных технологий на литейном предприятии позволяет в значительной мере оптимизировать производственный процесс.

Технологический процесс литья по выжигаемым моделям схож с другой технологией точного литья – литьем по выплавляемым моделям [1], однако обладает рядом преимуществ, а именно: оперативностью получения изделия, общей экономией времени реализации проекта, а также в некоторых случаях снижением затрат на энергию и материалы.

3D-принтер [2] воспроизводит практически любые формы и конфигурации, что невыполнимо при традиционном литье. Модели, которые созданы для литья по выжигаемым моделям аддитивными методами, могут быть гораздо тоньше, чем стандартно производимые в пресс-формах [3] из легкоплавкого модельного состава.

Применение аддитивных технологий в производстве экономически целесообразно за счет снижения затрат на изготовление продукции и рабочую силу, а также за счет уменьшения время производства.

Актуальностью работы связана с тем, что комбинированной технологии литья, сочетающая в себе изготовление выжигаемых моделей отливок по *FDM*-технологии с изготовлением элементов ЛПС из легкоплавкой смеси, в условиях единичного и мелкосерийного производства на предприятиях имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционной технологией производства, а именно:

- отсутствие необходимости изготовления дорогостоящей оснастки;
- снижение себестоимости изделий;
- возможность изготовления сложных по конфигурации отливок.

Целью магистерской диссертации является разработка комбинированной технологии литья с применением выжигаемых моделей отливок, изготовленных по *FDM*-технологии, и выплавляемых моделей литниково-питающей системы, изготовленных по традиционной технологии в пресс-формах.

Для достижения обозначенной цели были поставлены следующие задачи:

- провести литературно-патентный обзор по данной теме [4];
- выбрать материал, наиболее подходящий для изготовления выжигаемых моделей по *FDM* технологии [5];
- отработать технологию изготовления моделей ЛПС из легкоплавкой смеси;
- отработать технологию изготовления керамических форм;
- изготовить опытную партию стальных отливок,
- изучить химический состав и механические свойства, исследовать микро-структуру полученных отливок.

1 Литературно-патентный обзор технологии литья по выжигаемым моделям

Литературно-патентный обзор – изучение состояния технического уровня, тенденций развития, разработки технологий и оборудования относящихся к определенному виду деятельности [4].

Результаты литературно-патентного обзора используются при написании дипломных, выпускных и кандидатских работ.

Обзор проводят как в процессе теоретических разработок, так и при проведении опытных работ. Выполнение профессионального исследования в ходе литературно-патентного обзора на сегодняшний день является одним из ключевых факторов для успешного достижения цели.

В наше время подобный метод актуален в единичном производстве стальных отливок для нужд всех областей металлургии и машиностроения.

Целью литературно-патентного обзора является определение современного состояния исследований, разработок, внедрения новых материалов и оборудования в технологию литья по выжигаемым моделям.

1.1 Литературный обзор технологии литья по выжигаемым моделям

В учебном пособии [6] описана технология получения отливок методом литья по газифицируемым моделям в формы из сухого песка и в формы из ферромагнитного формовочного материала.

Литье по выжигаемым моделям, как и литье по выплавляемым моделям, осуществляется в неразъемную форму, а модель удаляется путем выжигания.

В процессе заливки формы жидким металлом под действием высокой температуры происходит газификация пенополистирола, из которого изготовлена модель отливки. Процесс замещения газифицируемой модели из пенополистирола происходит постепенно по мере поступления жидкого металла в форму.

Способ производства отливок методом литья по газифицируемым моделям был предложен в 1958 году Г. Шрейером.

Литьем по выжигаемым моделям можно получать отливки в разовые песчаные формы или же в формы из ферромагнитных материалов, находящихся под действием магнитного поля.

Модели из полистирола могут быть изготовлены, также как и выплавляемые модели, в пресс-формах, а также вырезаться из пенопласта.

При изготовлении моделей в пресс-формах в качестве расходного материала используется вспенивающийся полистирол, который обычно поставляется в гранулах. Под воздействием тепла гранулы вспениваются, увеличиваясь в размере в несколько раз. В пресс-форму засыпается необходимое рассчитываемое количество гранул полистирола и подается пар. Такая технология получения отливок подходит для серийного производства. Для единичного производства лучше подходят модели, вырезаемые из пенополистирола.

В качестве материала для форм при литье по выжигаемым моделям допускает использование сухого песка без всякого связующего, что значительно снижает трудоемкость процесса. Стоит отметить, что при изготовлении форм из

сухого песка без связующего из-за несоответствия размеров отливки и газифицирующей модели, а также вследствие появления песчаных засоров довольно значительное количество отливок бракуется.

Для повышения качества поверхности будущей отливки и стабилизации песчаной формы, модель окрашивается быстросохнущей краской. Тепловая сушка моделей из полистирола неприемлема.

Может применяться вакуумирование формы, что обеспечивает удержание песка и удаление продуктов сгорания модели.

В 70-х годах двадцатого века изобретен способ литья в магнитные формы. Его суть заключается в следующем: пенополистироловая модель формуется ферромагнитным формовочным материалом и помещается в магнитное поле. Из-за действия магнитного поля форма из ферромагнитного формовочного материала не рассыпается. После заливки, действие магнитного поля прекращается, а форма из ферромагнитного материала рассыпается.

Такой способ литья имеет все плюсы литья в формы из сухого кварцевого песка, но при этом исключает возможность образования песчаных засоров.

Однако таким способом можно получить отливки сравнительно небольшой массы и довольно простой конфигурации, из-за неоднородной уплотненности форм из ферромагнитного материала под действием магнитного поля. Наиболее уплотненным получается материал формы, находящийся вдоль магнитных линий. Поэтому для литья крупногабаритных отливок требуется большая напряженность магнитного поля, что пока невозможно осуществить на производстве.

В статье [7] описывается технология получения стальных отливок по выжи-гаемым аддитивным *FDM*-моделям, эффективная в условиях опытно-конструкторских работ, показаны основные этапы технологические особенности.

Основное преимущество такой технологии по сравнению с традиционной, подразумевающей изготовление выплавляемых моделей в пресс-форме, является сокращение времени получения первой отливки на величину до 90,0 %, а также снижение затрат и производственных рисков.

Однако у технологии получения отливок методом литья по выжигаемым аддитивным моделям есть и минусы. Качество поверхности моделей, построенных по *FDM*-технологии, оставляет желать лучшего. Процесс последующей обработки моделей шлифованием слишком трудоемкий и длительных. В статье приводится способ решения данной проблемы, а именно химическое оплавление поверхности. Напечатанная по *FDM*-технологии модель погружается в смесь метилхлорида CH_2Cl_2 и трихлорэтилена C_2HCl_3 на несколько секунд, так, чтобы растворитель не успел проникнуть в ее внутренние полости. Затем, модель подвергается сушке в течение нескольких часов. Кратковременная обработка сохраняет микрорельеф, но придает блеск поверхности. По мере увеличения времени выдержки модели в растворителе микрорельеф сглаживается или же исчезает полностью.

В ходе выжигания модели автор сталкивается с проблемой разрушения оболочковой керамической формы. В статье приведено решение и этой проблемы. С целью сохранения целостности оболочковой формы, модель формирующая ее внутреннюю полость должна быть пустотелой и тонкостенной. Перед формовкой в литейную оболочку заливается растворитель, который разупрочняет модель. Затем, растворитель сливается, а оболочка наполняется негорючим газом и модель выжигается.

Уменьшение массы выжигаемого материала и продувка формы после прокали сжатым воздухом повышает чистоту литейной формы, однако автор уточняет, что наилучшие результаты дало охлаждение формы после выжигания и ее промывка водой.

1.2 Патентный обзор технологии литья по выжигаемым моделям

Патентное исследование – исследование технического уровня и тенденций развития объектов техники, их патентоспособности и патентной чистоты, а также уровня компетентности фирмы или частного лица в данной области [4].

Цель исследования – определение технического уровня и тенденций развития в области литья по выжигаемым моделям, поиск патентной и научно-технической информации по данной теме.

Регламент патентного поиска – план поиска. Он состоит из определения вида исследований, вида поиска, его глубины или ретроспективности (количества лет) и его широты (перечень стран, которыми ограничивают объём поиска). В регламент входит выбор источников информации, по которым будет вестись поиск аналогов объекта, а также индекс МПК (международная патентная классификация). Источники информации выбирают исходя из установленных глубины и широты поиска, учитывая при этом реальную доступность этих источников.

Выбранные элементы регламента приведены в таблице. В ней записаны индексы МПК, в заголовке таблицы регламента указано общее название исследуемого объекта.

Исследуемый объект – процесс литья по выжигаемым моделям.

Предмет поиска – литье по выжигаемым моделям.

Вид исследований и вид поиска – патентные исследования, тематический поиск.

Наименование информационной базы (фонда) – патентные фонды Федерального института промышленной собственности (ФИПС).

Регламент патентного поиска представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Регламент патентного поиска

Предмет поиска	Индекс МПК	Широта поиска	Глубина поиска	Источник информации
Литье по выжигаемым моделям	B22C 1/00, B22C 9/04, B22C 7/02, B22C 1/16	Россия	5 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС

Результаты патентного поиска представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты патентного поиска

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс МПК	Заявитель (патенто-обладатель) номер заявки, страна, дата публикации	Название изобретения (полной модели, образца)
Литье по выжигаемым моделям	Россия, патент, RU 2773975 C1, B22C 7/02	Леушин Игорь Олегович (RU), Грачев Александр Николаевич (RU), Леушина Любовь Игоревна (RU), Сорокин Сергей Борисович (RU), Явтушенко Павел Михайлович (RU), 2021134896, Россия, 29.11.2021	Способ сборки блока удаляемых литейных моделей [8]

Продолжение таблицы 2

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс МПК	Заявитель (патенто-обладатель) номер заявки, страна, дата публикации	Название изобретения (полной модели, образца)
Литье по выжигаемым моделям	Россия, патент, <i>RU 2781943 C1</i> , <i>B22C 9/04</i>	Шилов Александр Владимирович (<i>RU</i>), 2022111014, Россия 21.10.2022	Способ изготовления керамической формы по выжигаемой полимерной модели в литье по выплавляемым моделям [9]
Литье по выжигаемым полимерным моделям	Россия, патент, <i>RU 2771419 C1</i> , <i>B22C 1/02</i> , <i>B22C 1/16</i> , <i>B22C 9/04</i>	Леушин Игорь Олегович (<i>RU</i>), Грачев Александр Николаевич (<i>RU</i>), Леушина Любовь Игоревна (<i>RU</i>), Сорокин Сергей Борисович (<i>RU</i>), Явтушенко Павел Михайлович (<i>RU</i>), 2021134901, Россия, 29.11.2021	Суспензия для лицевого слоя керамической формы литья по термоудаляемым моделям [10]

Продолжение таблицы 2

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс МПК	Заявитель (патенто-обладатель) номер заявки, страна, дата публикации	Название изобретения (полной модели, образца)
Литье по выжигаемым моделям	Россия, патент, <i>RU 2697678 C1</i> , <i>B22C 1/00</i>	Белов Владимир Дмитриевич (<i>RU</i>), Фадеев Алексей Владимирович (<i>RU</i>), Фоломейкин Юрий Иванович (<i>RU</i>), Колтыгин Андрей Вадимович (<i>RU</i>), Никифоров Павел Николаевич (<i>RU</i>), 2018144662, Россия, 17.12.2018	Способ изготовления керамических форм для литья по выплавляемым моделям [11]
Литье по выжигаемым моделям	Россия, патент, <i>RU 2772531 C1</i> , <i>B22C 9/04</i> , <i>B22C 7/02</i>	Шилов Александр Владимирович (<i>RU</i>), 2021138594, Россия, 23.05.2022	Способ удаления выжигаемой полимерной модели из керамической формы в литье по выплавляемым моделям [12]

По результатам литературно-патентного обзора можно сделать вывод о том, что большинство разработок новые и не имеют аналогов, этому свидетельствуют документы о регистрации интеллектуальной собственности (патенты). Больше число патентов принадлежит научно-исследовательским институтам. Разработки широко применяются в производстве, этому свидетельствуют заказы на изготовление стального литья по выжигаемым моделям от крупных машиностроительных, судостроительных, приборостроительных заводов.

2 Оборудование, используемое при отработке технологии литья по выжигаемым моделям

2.1 Оборудование для печати по *FDM*-технологии

3D-принтер Альфа 2 отечественного производства, является обновленной версией принтера Альфа.

На рисунке 1 представлен 3D-принтер Альфа 2.

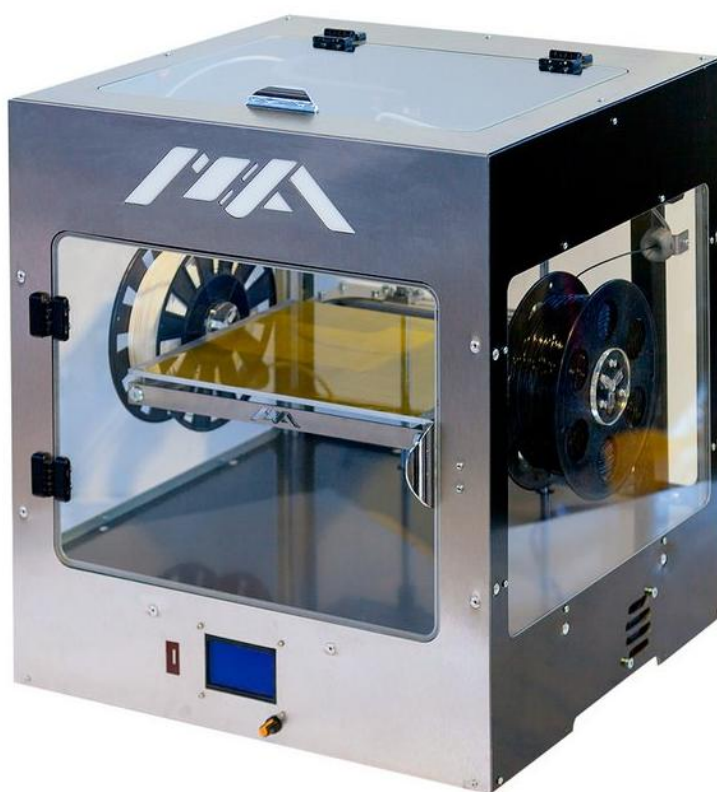


Рисунок 1 – 3D-принтер Альфа 2

3D-принтер Альфа 2 обладает двумя экструдерами, что существенно увеличивает скорость печати. Корпус принтера выполнен из прочного алюминиевого сплава. Герметичность камеры позволяет исключить негативное влияние влажности воздуха и перепадов температур на процесс печати.

Технические характеристики 3D-принтера Альфа 2 представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики Альфа 2

Наименование характеристики	Значение
Диаметр нити, мм	1,75
Температура экструдера, °C	280
Температура стола, °C	105
Область печать, мм	250,0×250,0×250,0
Скорость печати, м/с	10,0...100,0
Толщина слоя, мкм	30,0

2.2 Оборудование для подготовки образцов

Saphir 560 с головой *Rubin 520* представляет собой двухдисковую шлифовально-полировальную машину с шлифовально-полировальной головой последнего инновационного поколения с диаметром рабочего диска диаметром от 200,0 до 300,0 мм. Голова *Rubin 520* оборудована автоматическим защитным кожухом. Механизм регулировки по высоте с пневматической фиксацией и все характеристики базовой комплектации машины *Saphir 560* отвечает самым высоким требованиям. Глубину съема материала может быть задана предварительно с точностью 0,01 мм. Измерение съема материала происходит автоматически. После достижения заданного параметра машина выключается автоматически.

Шлифовально-полировальный станок *Saphir 560* представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Шлифовально-полировальный станок *Saphir 560*

Технические характеристики шлифовально-полировального станка *Saphir 560* представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Технические характеристики шлифовально-полировального станка *Saphir 560*

Наименование характеристики	Значение
Диаметр рабочих дисков, мм	200,0...300,0
Количество образцов, шт	1...6
Усилие единичного давления, Н	5,0...100,0
Потребляемая мощность, кВт	4,4
Скорость шлифовки, об/мин	500,0...600,0
Масса станка, кг	110,0

2.3 Оборудование для анализа химического состава

Анализатор серии *Foundry-Master Lab Pro* работает по методу эмиссионно-го оптического спектрального анализа с возбуждением пробы при помощи искры. При проведении анализа аргон обтекает исследуемый объект, а спектрометр фиксирует интенсивность излучения, на основе чего анализируется состав металла. Вакуумная система, используемая в оптике спектрометра, позволяет анализировать все элементы, лежащие в ультрафиолетовом спектре. При этом работа вакуумного насоса продолжается непрерывно.

Анализатор серии *Foundry-Master Lab Pro* представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 – *Foundry-Master Lab Pro*

Характеристики оптико-эмиссионного анализатора *Foundry-Master Lab Pro* представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики спектрометра *Foundry-Master Lab Pro*

Наименование характеристики	Значение
Диапазон длин волн, нм	130,0...800,0
Потребляемая мощность, Вт	2000,0
Масса спектрометра, кг	160,0
Габариты, мм	1130,0×840,0×720,0

2.4 Оборудование для испытаний на растяжение

Механические испытания на растяжение [13] образцов из стали 35Л проводятся на настольной испытательной машине *Galdabini Quasar 50*.

Испытательные машины *Galdabini Quasar* сконструированы с учетом требований к проведению механических испытаний различных материалов и изделий из них.

Настольной испытательной машине *Galdabini Quasar 50* представлена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Настольной испытательной машине *Galdabini Quasar 50*

Конструкция является модульной, на машину можно легко устанавливать различные захваты и приспособления, такие как экстензометры, дополнительные датчики силы и многое другое. Экстензометр – устройство для измерения изменения длины образца при механических испытаниях на разрыв.

Навесной экстензометр представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Навесной экстензометр

Технические характеристики настольной испытательной машины *Galdabini Quasar 50* представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Технические характеристики испытательной машины *Galdabini Quasar 50*

Наименование характеристики	Значение
Масса машины, кг	255,0
Потребляемая мощность, Вт	650,0
Габаритные размеры, мм	1635,0×790,0×780,0
Расстояние между колоннами, мм	410,0
Максимальное усилие, кН	50,0

2.5 Оборудование для испытания на ударную вязкость

Маятниковые копры серии *Jinan TE JB-300* предназначены для испытания образцов на ударную вязкость [14].

Принцип действия маятниковых копров серии *Jinan TE JB-300* основан на измерении количества энергии, затрачивающейся на разрушение образца при механических испытаниях на ударную вязкость. Количество затраченной энергии определяется разностью между потенциальной энергией маятника копра до удара, и после разрушения образца.

Маятниковые копры серии *Jinan TE JB-300* оснащены аналоговой круговой шкалой.

Маятниковый копер *Jinan TE JBW-300* представлен на рисунке 6.



Рисунок 6 – Маятниковый копёр *Jinan TE JBW-300*

Технические характеристики маятникового копра *Jinan TE JB-300* представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Технические характеристики маятникового копра

Наименование характеристики	Значение
Скорость движения маятника в момент удара, м/с	5,24
Габаритные размеры, мм	2100,0×900,0×2000,0
Масса, кг	550,0
Диапазон рабочих температур, °C	10...35

2.6 Оборудование для исследования микроструктуры

Анализатор микроструктуры металлов и сплавов *Thixomet SmartDrive* дает возможность построения панорамных изображений исследуемой поверхности образца с высоким разрешением. Панорамное изображение формируется склеиванием нескольких смежных изображений поверхности образца в поле зрения.

Анализатор изображения *Thixomet SmartDrive* представлен на рисунке 7.

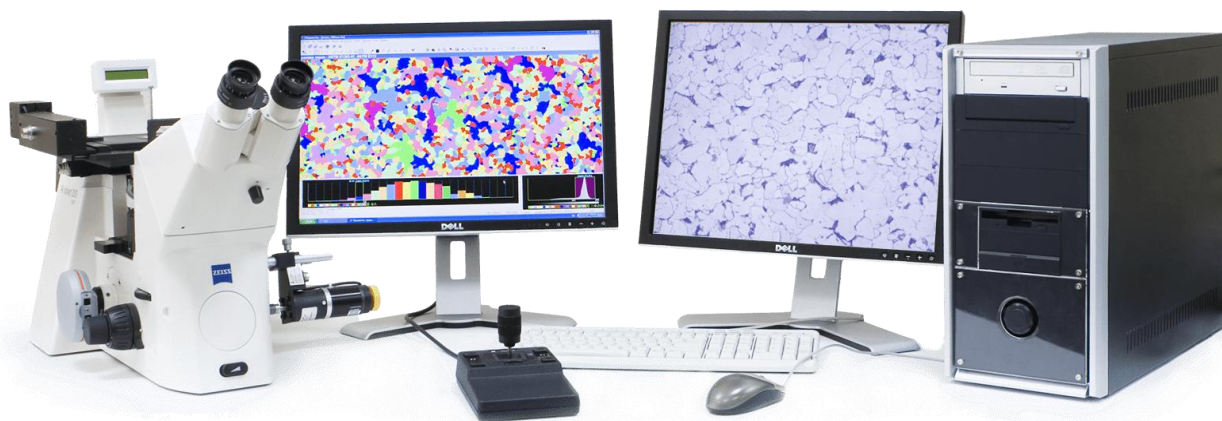


Рисунок 7 – Анализатор изображения *Thixomet SmartDrive*

Анализатор микроструктуры *Thixomet SmartDrive* обладает функцией выравнивания фона, которая решает проблему неравномерной освещенности поверхности образца, как в пределах одного поля зрения, так и на всей панораме.

Для анализа микроструктуры образцов, исследуемая поверхность которых располагается под углом к анализатору, есть возможность подстройки фокуса по трем точками.

2.7 Оборудование для нагрева и термообработки черных металлов

2.7.1 Печь камерного типа ПКМ 12.22.7/11М

Печь камерного типа ПКМ являются наиболее универсальными. Благодаря широкой номенклатуре, печи с разными размерами рабочей камеры используются как для нагрева и термообработки черных металлов [14].

Печь камерного типа ПКМ 12.22.7/11М представлена на рисунке 8.



Рисунок 8 – Печь камерного типа ПКМ 12.22.7/11М

Особенности конструкции ПКМ 12.22.7/11М:

- трехсторонний обогрев (боковые стены и под [14]);
- подовые нагреватели защищены карбидокремниевыми плитами толщиной 25,0 мм;
- опоры под спирали-керамические трубки с толщиной стенки не менее 5,0 мм;
- опоры под керамические трубки через каждые 40,0 мм;
- равномерное распределение температуры в камере печи;
- защита от теплового излучения при открытии двери (дверь открывающаяся вверх);
- высокоэффективная многослойная изоляция;
- экономия электроэнергии;
- современная система регулировки температуры (микропроцессорный контроллер);
- современные индуктивные датчики отключения электроэнергии при открытии двери.

Основные характеристики печи камерного типа ПКМ 12.22.7/11М представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Основные характеристики печи камерного типа ПКМ 12.22.7/11М

Наименование характеристики	Значение
Внешние размеры, мм	3800,0×2300,0×3400,0
Размеры рабочего пространства, мм	2200,0×1200,0×700,0
Максимальная температура нагрева, °С	1100
Мощность, кВт	120,0
Вес, кг	5500,0

2.7.2 Электродпечь сопротивления камерная СНО 3.6.2/10И2

Электродпечь сопротивления камерная СНО 3.6.2/10И2 предназначена для термообработки изделий в окислительной атмосфере до температуры 1000 °С.

Электродпечь камерная СНО 3.6.2/10И2 представлена на рисунке 9.



Рисунок 9 – Электродпечь камерная СНО 3.6.2/10И2

Кожух [14] электродпечи сварен из листовой и профильной стали. На задней стенке имеется арматура для выводов нагревателей, на свободе – для двух термодпар. Одна термодпара – регулирующая, вторая – контрольная. Футеровка [14] со-

стоит из двух слоев, на подине имеются опорные столбики, на которые укладываются подовые плиты. В столбиках предусмотрены пазы для обеспечения циркуляции атмосферы. В электропечах СНО 3.6.2/10И2 свод [14] и боковые стенки грузочного проема выложены без раствора, что позволяет быстро производить смену нагревателей.

Проволочные нагреватели выполнены из сплава с высоким сопротивлением марки Х20Н80-Н. Сплав содержит 20,0 % хрома, 80,0 % никеля. Приставка «Н» в конце названия означает, что в базовый состав нихрома добавлен цирконий Zr от 0,2 до 0,5%.

Принцип действия электропечи следующий:

- при достижении в рабочем пространстве электропечи заданной температуры нагреватели отключаются, затем открывается заслонка;
- изделия загружаются в электропечь, после чего закрывается заслонка;
- включаются нагреватели, и происходит термообработка садки по технологическому режиму;
- по окончании термообработки нагреватели отключаются, заслонка открывается, садка выгружается из электропечи, цикл повторяется.

Основные характеристики электропечи СНО 3.6.2/10И2 в таблице 9.

Таблица 9 – Основные характеристики электропечи камерной СНО 3.6.2/10И2

Наименование характеристики	Значение
Размеры рабочего пространства, мм	300,0×600,0×200,0
Максимальная температура нагрева, °С	1000
Установленная мощность, кВт	14,0
Мощность холостого хода, кВт	4,5

3 Материалы, используемые при отработке технологии лить по выжигаемым моделям

3.1 Нелегированная литейная сталь 35Л

В настоящее время стальные отливки используют во всех отраслях машиностроения. По объему производства они занимают второе место. Из сталей отливают обычно детали, к которым предъявляют повышенные требования по прочности, пластичности, надежности и долговечности в процессе эксплуатации.

Нелегированная сталь для отливок марки 35Л [16] предназначена для производства деталей работающих под воздействием средних статических и динамических нагрузок.

Число 35 свидетельствует о содержании в химическом составе стали 0,35 % углерода, а литера «Л» классифицирует сталь как – литейную [16].

Заменитель (материал, близкий по основным параметрам): 30Л, 40Л, 45Л.

Из стали 35Л изготавливают: балансиры, бегунки, валки, диафрагмы, задвижки, зубчатые колеса, станины прокатных станов, тяги, катки, кронштейны и другие детали.

Химический состав стали 35Л по ГОСТ 977-88 указан в таблице 10 [16].

Таблица 10 – Химический состав стали 35Л по ГОСТ 977-88

Химический элемент	Содержание, %
Углерод	0,32...0,40
Марганец	0,40...0,90
Кремний	0,20...0,52
Хром	0,30
Никель	0,30
Фосфор	0,04

Медь	0,30
------	------

Продолжение таблицы 10

Химический элемент	Содержание, %
Сера	0,045

Углерод С – находится в стали обычно в виде химического соединения Fe_3C , называемого цементитом. С увеличением содержания углерода до 1,2 % твердость, прочность и упругость стали увеличиваются, но пластичность и сопротивление удару понижаются, а обрабатываемость ухудшается, ухудшается и свариваемость.

Кремний Si – если он содержится в стали в небольшом количестве, особого влияния на ее свойства не оказывает. Является полезной примесью, вводят в качестве активного раскислителя и остается в стали в количестве 0,4 %.

Марганец Mn – как и кремний, содержится в обыкновенной углеродистой стали в небольшом количестве и особого влияния на ее свойства также не оказывает. Вводится в сталь для раскисления и остается в ней в пределах от 0,3 до 0,8 %. Марганец уменьшает вредное влияние кислорода и серы. Марганец – при содержании свыше 1,0 % увеличивает твердость, износоустойчивость, стойкость против ударных нагрузок, не уменьшая пластичности.

Сера S – является вредной примесью. Она находится в стали главным образом в виде FeS . Это соединение сообщает стали хрупкость при высоких температурах, например при ковке, – свойство, которое называется красноломкостью. Сера увеличивает истираемость стали, понижает сопротивление усталости и уменьшает коррозионную стойкость. В углеродистой стали допускается серы не более 0,07 %. От красноломкости сталь предохраняет марганец, который связывает серу в сульфиды MnS .

Фосфор P – также является вредной примесью. Снижает вязкость при пониженных температурах, то есть вызывает хладноломкость. Обрабатываемость стали фосфор несколько улучшает, так как способствует отделению стружки.

Никель Ni – придает стали коррозионную стойкость, высокую прочность и пластичность, увеличивает прокаливаемость, оказывает влияние на изменение коэффициента теплового расширения. Никель – дорогой металл, его стараются заменить более дешевым.

Хром Cr – наиболее дешевый и распространенный элемент. Он повышает твердость и прочность, незначительно уменьшая пластичность, а также увеличивает коррозионную стойкость. Содержание большого количества хрома делает сталь нержавеющей и обеспечивает устойчивость магнитных сил.

Медь Cu – увеличивает антикоррозионные свойства, она вводится главным образом в строительную сталь.

Механические свойства стали нелегированной стали 35Л представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Механические свойства стали 35Л

Параметр	Значение
Предел текучести, МПа	280,0
Предел прочности, МПа	500,0
Относительное удлинение, %	15,0
Относительное сужение, %	25,0
Ударная вязкость, Дж/см ²	35,0

3.2 Расходные материалы для печати по *FDM*-технологии

Сырье для 3D-печати по *FDM*-технологии является филамент. Филамент – термопластичная нить [5]. На рынке существует множество типов нитей с различными свойствами и разным диаметром. Наиболее востребованным является филамент диаметром 1,75 и 2,85 мм [5].

Термопластичная нить для 3D-печати представлена на рисунке 10.



Рисунок 10 – Термопластичная нить для 3D-печати

Существует множество доступных материалов для 3D-печати по FDM-технологии. Выбор материала напрямую влияет на качество и стоимость печати. Наиболее распространенными материалами для 3D-печати по FDM-технологии являются АБС и ПЛА. Они также обладают наименьшей себестоимостью и являются наиболее востребованными на рынке.

АБС – акрилонитрил бутадиен стирол [17], ударопрочный непрозрачный термопластик на основе акрилонитрила с бутадиеном и стиролом. Используется в изготовлении крупных деталей автомобилей, корпусов бытовой техники, изделий сантехники, лодок, спортивного инвентаря, деталей оружия, музыкальных инструментов и прочего. Широкую популярность завоевал благодаря тому, что он нетоксичен в нормальных условиях, влагоустойчив, а также долговечен в отсутствии прямых солнечных лучей.

Относительно невысокая стоимость АБС-пластика и сравнительная легкость использования в качестве материала для 3D-печати привели к его высокой популярности при построении моделей по FDM-технологии.

Однако, АБС-пластику при нагреве свойственно выделение токсичных паров акрилонитрила, а значит, необходимы меры предосторожности при 3D-печати. Из-за того, что объем выделяемых паров относительно не велик, для обеспечения безопасности использования АБС-пластика требуется осуществлять работы в хорошо вентилируемом помещении.

Физические свойства АБС представлены в таблице 12 [17].

Таблица 12 – Физические свойства АБС

Физическая величина	Значение
Плотность, кг/м ³	1025,0
Температура плавления, °С	160...190
Температура стеклования, °С	110...125
Температура печати, °С	230...250

ПЛА – полимолочная кислота [17], является биоразлагаемым, биосовместимым термопластиком, основная составляющая которого – молочная кислота. ПЛА-пластик производят из кукурузы, сахарного тростника, картофельного и кукурузного крахмала, соевого белка, крупы из клубней маниока или целлюлоза.

ПЛА-пластик активно используется в качестве материала для печати на 3D-принтерах. Натуральное основа ПЛА-пластика позволяет без угрозы для здоровья человека применять его для изготовления одноразовой посуды и медицинского инвентаря.

Изделия, напечатанные из ПЛА, имеют высокое качество поверхности

Как правило, ПЛА-пластик поставляется в виде тонкой нити, которая намотана на катушку.

ПЛА-пластик обладает широкой цветовой палитрой.

Недостатком ПЛА является его низкая термостойкость, изделия из ПЛА не рекомендуется использовать при температуре выше 60 °С.

Физические свойства ПЛА представлены в таблице 13 [17].

Таблица 13 – Физические свойства ПЛА

Физическая величина	Значение
Плотность, кг/м ³	1230,0...1250,0
Температура плавления, °С	210...240
Температура стеклования, °С	60...65
Температура печати, °С	190...220

Готовые 3D модели представлены на рисунке 11.

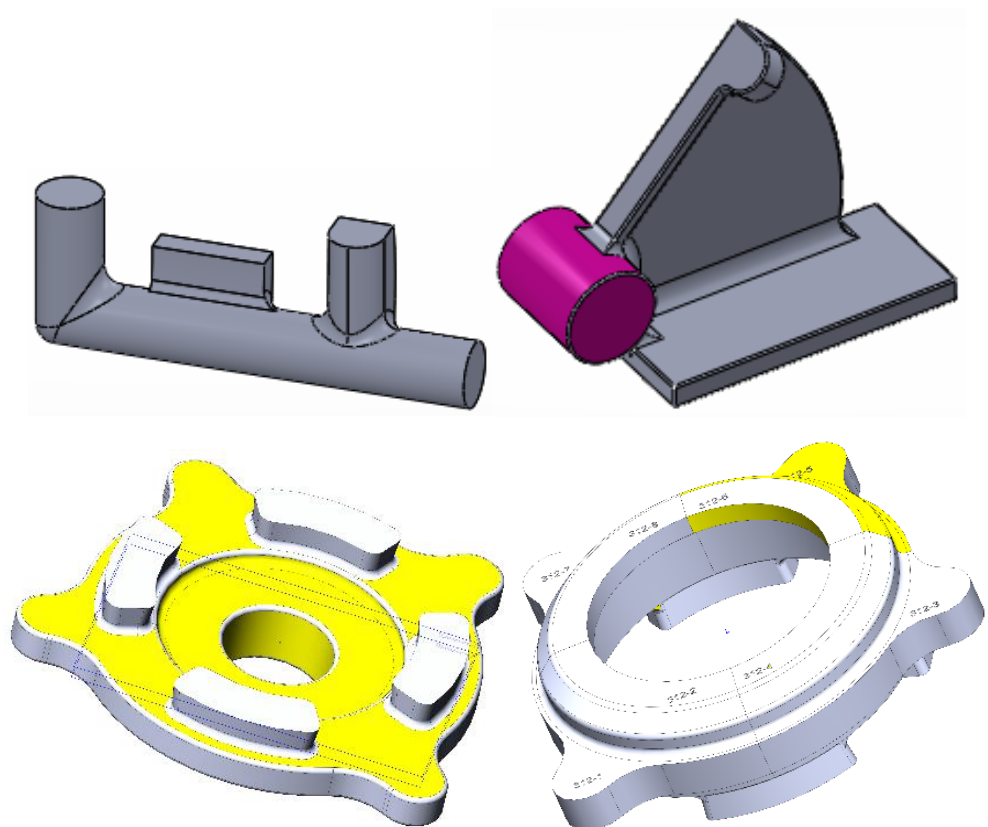


Рисунок 11 – 3D модели отливок

4.2 Изготовление моделей отливок по *FDM*-технологии

FDM – моделирование методом послойного направления [9]. Широко используется для печати трехмерных моделей, повторяющих форму и контуры их цифровых аналогов.

Цикл производства начинается с обработки трехмерной цифровой модели. Модель в формате *STL* делится на слои и ориентируется наиболее подходящим для печати образом. Далее задаются все параметры печати.

Как только температура становится необходимой, нить подается в экструдер и в сопло, где она расплавляется.

Экструдер перемещается в направлении осей *X*, *Y* и *Z* [2]. Печатная область заполняется в несколько заходов. Для затвердевания расплавленного материала требуется некоторое время. После заполнения слоя, платформа опускается вниз. Новый слой печатается на уже застывшем предыдущем. Процесс повторяется до тех пор, пока модель не будет напечатана целиком.

Если рабочая область 3D-принтера не позволяет напечатать большую модель целиком, её можно разбить на более мелкие части, а уже после печати склеить.

Склеенные модели представлены на рисунке 12.



Рисунок 12 – Склеенные полимерные модели

4.2.1 Недостатки 3D-печати по FDM-технологии

Самой распространенной проблемой при 3D-печати является деформация моделей при полимеризации пластика, это происходит из-за того, что разные участки модели охлаждаются с разной скоростью, что вызывает накопление внутренних напряжений. Решение проблемы – тщательный контроль температуры платформы и камеры в целом.

Также чаще всего подвержены деформации тонкие выступающие части и острые углы. Данные проблемы решаются путем предварительного добавления поддержек для моделей и скруглением углов.

Еще одной проблемой является адгезия между слоями при печати по FDM-технологии. Прочность связи между слоями всегда ниже прочности слоя, а это значит, что прочность по оси Z будет меньше, чем прочность по осям X и Y.

4.2.2 Выбор материала для печати по *FDM*-технологии

При выборе пластика для печати прототипов, используемых в литье по выжигаемым моделям, в первую очередь нужно обращать внимание на такое свойство, как зольность [18] этого материала. Уменьшение массы остатков сгорания материала повышает чистоту керамической формы, а значит, положительно влияет на качество получаемых стальных отливок.

Для определения материала с наименьшей зольностью, а значит наиболее пригодного для литья по выжигаемым моделям, печатаются по *FDM*-технологии на принтере Альфа 2 одностипные модели из АБС и ПЛА пластиков. Затем модели помещаются в камеру электропечи СНО 3.6.2/10И2, где выдерживаются при температуре 900 °С.

Образцы для определения зольности представлены на рисунке 13.



Рисунок 13 – Образцы для определения зольности

Результаты испытаний представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Результаты испытаний

Исследуемый параметр	Материал образца	
	АБС	ПЛА
Масса образца до проведения испытаний, г	23,227	25,94
Масса остатков сгорания, г	0,0495	0,12

Исходя из результатов испытаний можно сделать вывод, что АБС-пластик лучше подходит для печати выжигаемых моделей, используемых в литье, чем ПЛА, так как имеет меньшую массу продуктов сгорания.

4.3 Изготовление моделей ЛПС из легкоплавкой смеси

Элементы ЛПС [1] изготавливаются из легкоплавкого модельного состава: парафин [19] и стеарин [20]. Его приготовление осуществляется в специальной установке для плавки модельного состава.

В состав смеси может входить до 50,0 % возврата.

Возврат погружается в бак установки в первую очередь, а свежие составляющие во вторую.

Состав модельной смеси указан в таблице 15.

Таблица 15 – Состав модельной смеси

Наименование компонента	Содержание, %
Парафин	50,0
Стеарин	50,0
Пчелиный воск	не более 10,0

Воск [21] в состав модельной смеси вводится сверх 100,0 % для предотвращения появления трещин.

Для приготовления модельный состав нагревается до температуры 85 °С и тщательно перемешивается. Затем модельный состав выдерживается при той же температуре 30 минут для осаждения примесей. После чего он процеживается и переливается в отдельную емкость. По мере остывания модельный состав перемешивается до пастообразного состояния.

Модель коллектора [1] получается путём заполнения металлической пресс-формы [3] модельным составом. Температура модельного состава в пастообразном состоянии перед запрессовкой должна находиться в интервале от 40 до 45 °С.

Модель коллектора представлена на рисунке 14.



Рисунок 14 – Модель коллектора

Внутренняя полость пресс-формы очищается от остатков прилипшего модельного состава и смазывается. Затем в нее запрессовывается модельный состав, после затвердевания которого, пресс-форма раскрывается, а модель коллектора извлекается из неё.

Модель стояка [1] получается путём погружения металлического стояка в расплавленный модельный состав. Операция повторяется до тех пор, пока толщина слоя модельного состава не будет равной 4,0 мм.

Модель стояка представлена на рисунке 15.



Рисунок 15 – Модель стояка

Поверхности моделей зачищаются от заусенцев [22]. Исправимые дефекты на моделях заделываются жидким модельным составом или пчелиным воском. Модели с дефектами, не подлежащими исправлению, не допускаются до дальнейшего использования.

4.4 Сборка модельных блоков

Модель стояка фиксируется в перпендикулярном положении, затем при помощи паяльника к ней припаивается модель коллектора.

Собранные модельные блоки представлены на рисунке 16.



Рисунок 16 – Собранные модельные блоки

4.5 Технология изготовления керамических форм

4.5.1 Подготовка кварцевого песка

Для присыпки модельных блоков кварцевый песок [23] очищается от

глинистой составляющей и посторонних включений. Сушится в печи при температуре не ниже 500 °С в течение 4 часов. Затем, по окончании сушки, песок охлаждается до температуры помещения.

4.5.2 Приготовление суспензии

Состав огнеупорного покрытия приведен в таблице 16.

Таблица 16 – Состав огнеупорного покрытия

Наименование компонента	Количество
Этилсиликат, л	15,0
Вода, л	14,0
Вспомогательное вещество ОП-7 или ОП-10, г	60,0
Соляная кислота, л	0,5
Серная кислота, л	0,18
Пылевидный кварц, кг	65,0...70,0

В бак мешалки вливаются 15,0 литров этилсиликата [24] и 14,0 литров водопроводной воды [25], далее вводятся 30,0 граммов вспомогательного вещества ОП-7 или ОП-10 [26] и перемешивается в течение 1 минуты.

Далее вводится половина навески пылевидного кварца и осуществляется перемешивание содержимого бака в течение 5 минут.

Соляная кислота [27] является катализатор гидролиза – повышает надежность протекания процесса гидролиза этилсиликата, способствует повышению прочности формы.

Серная кислота [28] вводится в раствор при гидролизе для нейтрализации органических примесей.

При смешивании кислоты с водой – кислота льется в воду тонкой струйкой при постоянном перемешивании.

После перемешивания в течение 5 минут, вводится оставшаяся часть

пылевидного кварцевого песка, затем процесс перемешивания продолжается в течение от 50 до 60 минут.

Далее вводится оставшаяся часть вспомогательного вещества ОП-7 или ОП-10 и смесь в баке перемешивается от 3 до 5 минуты.

При помощи вискозиметра определяется вязкость полученной суспензии.

При недостаточной или избыточной вязкости необходимо выполнить корректировку состава огнеупорной смеси, для этого готовится гидролизированный раствор этилсиликата и вводится в смесь в заданном процентном содержании (таблица 17).

Таблица 17 – Состав гидролизованного раствора

Наименование компонента	Содержание, %
Этилсиликат,	60,0
Вода водопроводная	40,0
Соляная кислота	0,5

4.5.3 Изготовление керамических форм

Собранный модельный блок погружается в суспензию несколько раз, затем обсыпается сухим песком до полного насыщения. Толщина одного слоя покрытия должна быть в интервале от 0,8 до 1,5 мм. Слой песка должен быть равномерным на всей поверхности модельного блока.

Затем осуществляется сушка форм в камере для воздушно-аммиачной сушки при избыточном давлении $0,6 \cdot 10^5$ Па в течение 7 минут и 30 минут – при нормальном.

Блоки проветриваются на воздухе до полного исчезновения запаха аммиака.

На каждый модельный блок наносится от 4 до 6 слоев огнеупорного покрытия, при этом каждый новый слой сушится в камере воздушно-аммиачной сушки.

Керамические формы, готовые к выплавке модельного состава,

представлены на рисунке 17.



Рисунок 17 – Керамическая форма перед выплавкой модельного состава

Модельный состав удаляется из форм путем погружения их в воду, нагретую до 80 °С. Выплавка легкоплавкой модельной смеси длится в течение 20 минут. Для предотвращения омыления стеарина допускается введение в воду соляной кислоты до 0,1 %.

Далее извлекается металлический стояк и производится сушка керамических форм в течение 30 минут.

4.5.4 Контроль качества керамических форм

Заделке подлежат только незначительные дефекты керамических форм.

Трещины или отверстия замазываются предварительно намоченным в воде асбестом [29] и покрываются жидким стеклом [30].

На формах перед заливкой не допускаются: трещины, отверстия, набухания, сползания и расслоения огнеупорного керамического покрытия.

4.5.5 Выжигание моделей из керамических форм

Модель из АБС-пластика выжигается из керамической формы в камерной электропечи СНО 3.6.2/10И2.

Режим выжигания моделей:

- нагрев с 20 до 350 °С, скорость нагрева от 120,0 до 150,0 °С/час;
- выдержка при температуре 350 °С в течение 2 часов;
- нагрев с 350 до 720 °С, скорость нагрева от 120,0 до 150,0 °С/час;
- выдержка при температуре 720 °С в течение 2 часов.

После окончания выжигания полимерной модели, необходимо выключить печь. Охлаждение формы до 80 °С осуществляется в камере печи, а затем продолжается на воздухе.

Прокалка формы осуществляется в прокалочной печи ПКМ 12.22.7/11М при температуре 900 °С в течение 6 часов. Прокалка необходима для удаления газотворных составляющих керамических форм и улучшения заполняемости их металлом.

Керамическая форма после прокалки представлена на рисунке 18.



Рисунок 18 – Керамические формы после прокалки

Оставшиеся остатки сгорания полимера удаляются при продувке керамических форм.

Керамические формы после продувки формуются в опоки [31] и доставляются на место заливки.

Опоки представлены на рисунке 19.



Рисунок 19 – Опоки

4.6 Процесс литья стали 35Л, контроль качества, термическая и механическая обработка отливок

4.6.1 Заливка форм, выбивка, очистка отливок

В первую очередь проводится очистка тигля от остатков предыдущей плавки и осмотр на пригодность для дальнейшей эксплуатации. При необходимости производится ремонт.

Затем в тигель загружаются шихтовые материалы. Шихта должна состоять из углеродистой стали и возврата собственного производства [32].

Загруженная шихта расплавляется. По мере расплавления в тигель загружается оставшаяся часть шихтовых материалов.

Далее в расплав вводится предварительно подогретая навеска чугуна [33]. Чугун вводится в расплав для увеличения процентного содержания углерода в сплаве.

Ферросилиций [34] вводится в шихту с учетом кремния, имеющегося в остальных компонентах расплава.

Температура расплава поднимается до 1590°C .

Для раскисления в расплав вводится навеска ферромарганца [35], при этом учитывается содержание марганца в остальных компонентах шихты.

Затем расплав подогревается до температуры 1660°C , с поверхности снимается шлак и вводится навеска алюминия массой от 15,0 до 25,0 грамм для раскисления стали.

Расплав разливается в ковши подогретые до температуры 900°C и разливается по формам.

На рисунке 20 представлены керамические оболочковые формы после заливки.

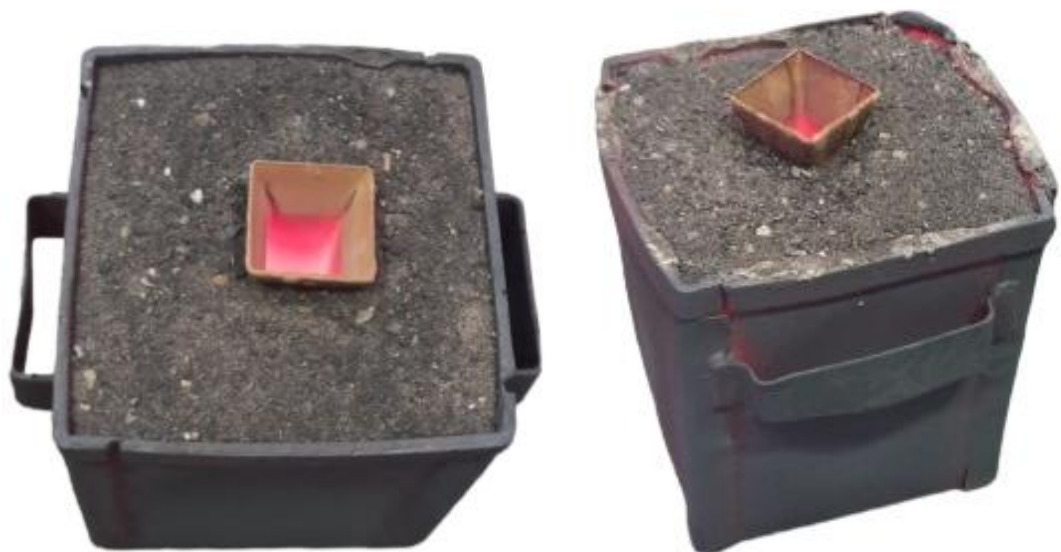


Рисунок 20 – Разлитый по формам расплав

Далее заливаются керамические формы под образцы для определения химического состава и механических свойств.

Керамическая форма под образцы для определения химического состава и механических свойств представлена на рисунке 21.



Рисунок 21 – Керамическая форма под образцы для определения химического состава и механических свойств

После затвердевания отливку выдерживают в форме для охлаждения до температуры выбивки. Чем выше температура выбивки, тем короче технологический цикл изготовления отливки и выше экономическая целесообразность при ее производстве. Однако ранняя выбивка приводит к образованию трещин, короблению и сохранению в теле отливки высоких остаточных напряжений.

Оптимальной для выбивки среднегабаритных и малогабаритных отливок из стали 35Л из керамических форм является температура в интервале от 80 до 100 °С.

4.6.2 Визуальный контроль качества отливок

По завершении выбивки отливки из формы и очистки ее от керамики, производится предварительный осмотр на наличие дефектов.

В результате визуального контроля выявлено, что в теле одной из полученных отливок присутствуют крупные газовые раковины [36], не подлежащие исправлению заваркой.

Крупная газовая раковина на поверхности отливки представлена на рисунке 22.



Рисунок 22 – Крупная газовая раковина на поверхности отливки

На поверхности второй отливки присутствует несколько небольших газовых раковин, а также незначительная пористость [36]. Данные дефекты подлежат исправлению заваркой.

Отливка с незначительными дефектами представлена на рисунке 23.



Рисунок 23 – Отливка с незначительными дефектами

Причиной образования газовых раковин послужило вскипание жидкого металла при взаимодействии расплава с несгоревшей массой полимеров, а также с продуктами сгорания, не удаленными из полости керамической формы.

Для исключения повторного появления подобных дефектов проводятся следующие изменения в технологическом процессе:

- модель ЛПС дополняется воздушными каналами и выпорами для улучшения удаления несгоревшей массы полимеров и продуктов сгорания;
- увеличивается максимальная температура выдержки керамических форм в камере прокалочной печи до 1000 °С, а также время выдержки до 8 часов.

Модель ЛПС дополненная воздушными каналами и выпорами представлена на рисунке 24.



Рисунок 24 – Модель ЛПС дополнена воздушными каналами и выпорами

С учетом вышеуказанных изменений в технологическом процессе, методом литья по выжигаемым моделям, получены отливки из стали 35Л.

4.6.3 Механическая и термическая обработка отливок

Обрезка ЛПС осуществляется на установке для обрезки литников или на фрезерном станке.

Отливки после обрезки ЛПС представлены на рисунке 25.



Рисунок 25 – Отливки после обрезки ЛПС

Высота остатка литника не должен превышать 5 мм от поверхности отливки.

Термическая обработка отливок и заготовок под образцы для механических испытаний и для исследования микроструктуры производится в камере электропечи СНО 3.6.2/10И2.

Для отливок из стали 35Л используются следующие режимы термической обработки: нормализация при 860 °С и отпуск при 630 °С [16].

Стальные отливки, после термической обработки, проходят через дробеструйную обработку, затем зачищаются от облоя и заусенцев заподлицо.

Отливка после зачистки представлена на рисунке 26.



Рисунок 26 – Отливка после зачистки

4.7 Анализ химического состава образцов из стали 35Л

Образцы для определения химического состава получают из литых брусков.

Литая заготовки под образец для химического анализа представлена на рисунке 27.



Рисунок 27 – Литая заготовка под образец для химического анализа

Исследуемая поверхность образца должна быть пригодной для проведения химического анализа, для этого одна из его сторон шлифуется.

Образец для химического анализа представлен на рисунке 28.



Рисунок 28 – Образец для химического анализа

Химический состав образца из стали 35Л анализируется при помощи спектрометра *Foundry-Master Lab Pro*.

Исходя из результатов анализа, химический состав стали 35Л соответствует требованиям ГОСТ 977-1988 [16].

Результатом измерений является процентное содержание массовых долей элемента в образце.

Результаты химического анализа представлен в таблице 18.

Таблица 18 – Результаты химического анализа

Химический элемент	Содержание, %
Углерод	0,32...0,40
Марганец	0,40...0,90
Кремний	0,20...0,52
Хром	0,30
Никель	0,30
Фосфор	0,04
Медь	0,30
Сера	0,045

4.8 Определение механических свойств стали 35Л

4.8.1 Подготовка стальных образцов для механических испытаний

Образцы для механических испытаний [13] вырезаются на металлорежущих станках из литых заготовок.

Литые заготовки под образцы для механических испытаний на разрыв представлены на рисунке 29.



Рисунок 29 – Литые заготовки под образцы для механических испытаний на разрыв

Форма и размеры образца определяются методом механических испытаний [13]. Наиболее распространенная форма поперечного сечения образцов – круглая и прямоугольная.

При изготовлении образцов принимаются меры, такие как охлаждение или соответствующие режимы обработки, полностью или частично, исключая возможность изменения свойства стали при нагреве.

Обработка поверхности рабочей части образца для механических испытаний на разрыв должна соответствовать 6 классу шероховатости. Форма и размеры головок образца определяются способом его крепления в захват машины для механических испытаний.

Образец для механических испытаний на разрыв представлен на рисунке 30.



Рисунок 30 – Образец для механических испытаний на разрыв

Для испытания на ударную вязкость [14] из литых заготовок вытачиваются образцы с сечением $10,0 \times 10,0$ мм, длиной 55,0 мм и с U-образным надрезом глубиной 2,0 мм.

Образец для механических испытаний на ударную вязкость с U-образным концентратором напряжения представлен на рисунке 31.



Рисунок 31 – Образец для механических испытаний на ударную вязкость с U-образным концентратором напряжения

4.8.2 Проведение механических испытаний

Для определения начальной площади поперечного сечения необходимые геометрические размеры образцов измеряют с погрешностью не более 0,5 %.

Относительно удлинение после разрыва δ_5 – отношение приращения длины образца к его первоначальной длине.

Относительное удлинение δ_5 определяется по формуле [13]:

$$\delta_5 = \left[\frac{(l-l_0)}{l_0} \right] \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где l – длина рабочей зоны образца до механических испытаний,

l_0 – длина рабочей зоны образца после механических испытаний.

Для определения относительного удлинения перед испытаниями по всей рабочей длине образца при помощи керн наносятся метки через каждые 5,0 или 10,0 мм. Затем, уже после механических, испытаний расстояние между метками измеряется повторно.

Временное сопротивление или же предел прочности σ_B – максимальная нагрузка, которую способен выдержать образец перед разрушением.

Предел текучести $\sigma_{0,2}$ – напряжение, при котором начинается пластическая деформация материала.

Ударная вязкость KCU определяется на стальном образце с искусственным концентратором напряжений в виде литеры U при помощи маятникового копра $TE JBW-300$ [14].

Образец после механических испытаний на ударную вязкость представлен на рисунке 32.



Рисунок 32 – Образец после механических испытаний на ударную вязкость

При испытаниях на ударную вязкость, образец, лежащий на двух опорах, подвергается удару молотка маятникового копра.

Числовые значения временного сопротивления σ_B и предела текучести $\sigma_{0,2}$ фиксируются машиной *Galdabini Quasar 50* при механических испытаниях стальных образцов. Образец после механических испытаний на разрыв представлен на рисунке 33.



Рисунок 33 – Образец после механических испытаний на разрыв

Относительное сужение при разрыве ψ – отношение уменьшения площади поперечного сечения образца в месте разрыва к площади первоначального сечения.

Относительное сужение при разрыве ψ определяется по формуле [13]:

$$\psi = \left[\frac{(F_0 - F_k)}{F_0} \right] \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где F_0 – площадь поперечного сечения образца, мм²;

F_k – площадь поперечного сечения в месте разрыва, мм².

Полученные результаты при механических испытаниях стальных образцов соответствуют требованиям ГОСТ 977-1988 [16].

Результаты механических испытаний представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Результаты механических испытаний

Параметр	Значение
Предел текучести, МПа	279,0
Предел прочности, МПа	495,0
Относительное удлинение, %	16,0
Относительное сужение, %	26,0
Ударная вязкость, Дж/см ²	35,1

4.9 Анализ микроструктуры стали 35Л

4.9.1 Подготовка микрошлифа для исследования микроструктуры стали 35Л

Микроанализ – исследование структуры и пороков металла с помощью микроскопа, то есть при больших увеличениях.

Изучение микроструктуры стали 35Л становится возможным после предварительной подготовки исследуемой поверхности образца, заключающейся в ее шлифовании на шлифовально-полировальном станке *Saphir 560* и травлении в 5,0 % спиртовом растворе азотной кислоты HNO_3 . Шлифованный и травленный образец называется микрошлифом [37].

Микрошлиф представлен на рисунке 34.



Рисунок 34 – Микрошлиф

4.9.2 Получение изображений микроструктуры поверхности стали 35Л

По результатам микроструктурного анализа, при помощи анализатора изображений металлов и сплавов *Thixomet SmartDrive*, выявлено, что среднеугле-

родистая сталь 35Л без термообработки имеет феррито-перлитную структуру с ориентированным распределением феррита и ферритную сетку по границам бывших аустенитных зерен.

После нормализации при 860 °С и высокотемпературного отпуска при 630 °С на поверхности исследуемого образца видны остатки неравномерного ориентированного распределения феррита в виде крупных включений и остатки ферритной сетки.

Микроструктура стали 35Л после нормализации при 860 °С и отпуска при 630 °С представлена на рисунке 35.

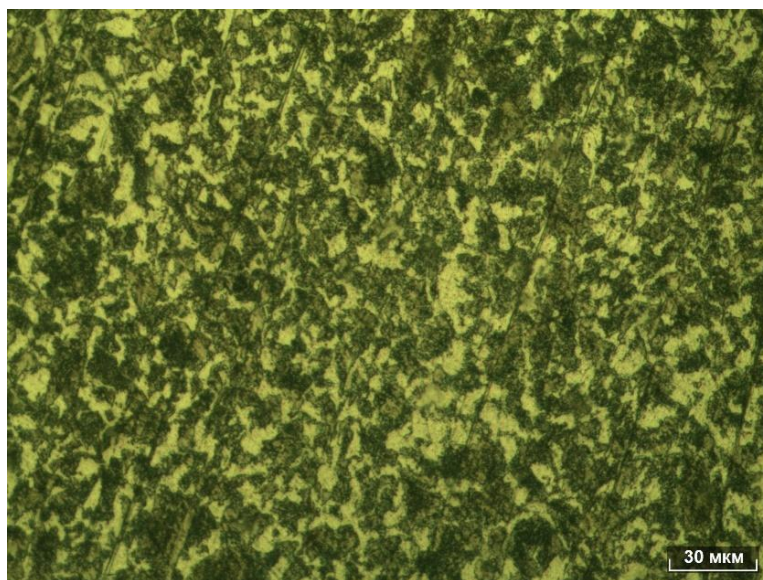


Рисунок 35 – Микроструктура стали 35Л после нормализации при 860 °С и отпуска при 630 °С при увеличении 500×

После нормализации при 860 °С и отпуска при 630 °С на поверхности исследуемого образца видны остатки неравномерного ориентированного распределения феррита в виде крупных выделений и остатки ферритной сетки.

Заключение

Для оценки уровня и тенденций технического развития литейного производства осуществлен литературно-патентный поиск. моделей и перспективных изобретений, внедрение которых в производство возможно в будущем.

Рассмотрены некоторые полезные модели и перспективные изобретения, внедрение которых в производство возможно в будущем.

Проведены испытания по определению зольности материалов для печати выжигаемых моделей по *FDM*-технологии.

По результатам испытаний сделан вывод, что АБС лучше подходит для печати выжигаемых моделей по *FDM*-технологии, чем ПЛА, так как обладает меньшей массой продуктов сгорания.

Выявлено, что существенное влияние на качество стальных отливок при литье по выжигаемым моделям оказывают:

- способ и качество удаления расплавленной массы полимеров, а также продуктов сгорания из полости формы;
- температура выдержки керамических форм в камере прокалочной печи;
- время выдержки керамических форм в печи, при вышеуказанной температуре.

Отработана технология изготовления моделей ЛПС из легкоплавкой смеси парафина и стеарина.

Отработана технология изготовления керамических форм.

В результате работы получены отливки из стали 35Л.

Результаты, полученные в ходе механических испытаний стали 35Л:

- предел текучести $\sigma_{0,2} = 279,0$ МПа;
- предел прочности $\sigma_B = 495,0$ МПа;
- относительное удлинение $\delta_5 = 16,0$ %;
- относительное сужение $\psi = 26,0$ %;

– ударная вязкость $KCU = 35,1 \text{ Дж/см}^2$.

Полученные результаты при механических испытаниях стальных образцов соответствуют требованиям ГОСТ 977-1988 [16].

В результате химического анализа стали 35Л, выявлено, что ее химический состав соответствует требованиям ГОСТ 977-1988 [16].

Проведен микроструктурный анализ стали 35Л после нормализации при 860°C и отпуска при 630°C , в результате которого выявлено, что сталь 35Л имеет феррито-перлитную структуру, соотношение перлита к ферриту 40 к 60 %

Таким образом, можно сделать вывод, что цель, определенная в магистерской диссертации, достигнута, были решены все поставленные задачи.

Список сокращений и условных обозначений

FDM – fused deposition modeling.

ЛПС – литниково-питающая система.

АБС – акрилонитрил бутадиент стирол.

ПЛА – полимолочная кислота.

Список литературы

1. ГОСТ 18169-1986 Процессы технологические литейного производства. Термины и определения. - М.: Изд-во стандартов, 1986. - 12 с.
2. ГОСТ 57558-2017 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1 термины и определения. - М.: Изд-во стандартов, 2018. - 16 с.
3. ГОСТ 19999-1974 Детали и приспособления пресс-форм для выплавляемых моделей. - М.: Издательство стандартов, 1982. - 11 с.
4. ГОСТ Р 15.011-2022 Система разработки и постановки продукции на производство. Патентные исследования. Содержание и порядок проведения. - М.: Изд-во стандартов, 2022. - 20 с.
5. ГОСТ Р 59100-2020 Пластмассы. Филаменты для аддитивных технологий. Общие технические требования. - М.: Изд-во стандартов, 2020. - 11 с.
6. Григорьев, В.М. Литье по выжигаемым моделям: учебно-методическое пособие / В.М. Григорьев - Хабаровск: Изд-во Хабаровского государственного технологического университета, 2002. - 58 с.
7. Андрианов, П.А. Литье стали по выжигаемым аддитивным моделям / П.А. Андрианов, А.Е. Колмаков, М.М. Уткин // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2019. № 4. - С. 436-443.
8. Способ сборки блока удаляемых литейных моделей: пат. 2773975 Рос. Федерация: МПК В22С 7/02 Леушин И.О., Грачев А.Н., Леушина Л.И., Сорокин С.Б., Явтушенко П.М.; заявитель и патентообладатель Нижний Новгород, ФБГОУ ВО "НГУ им. Р.Е. Алексеева". - № 2021134896; заявл. 29.11.2021; опубл. 14.06.2022, Бюл. № 17. - 7 с: ил.
9. Способ изготовления керамической формы по выжигаемой полимерной модели в литье по выплавляемым моделям: пат. 2781943 Рос. Федерация: МПК В22С 9/04 Шилов А.В.; заявитель и патентообладатель Пермь, АО "ОДК - Авиадвигатель". - № 2022111014; заявл. 22.04.2022; опубл. 21.10.2022, Бюл. № 30. - 12 с: ил.

10. Суспензия для лицевого слоя керамической формы литья по термоудаляемым моделям: пат. 2771419 Рос. Федерация: МПК В22С 1/02, В22С 1/16, В22С 9/04 Леушин И.О., Грачев А.Н., Леушина Л.И., Сорокин С.Б., Явтушенко П.М.; заявитель и патентообладатель Нижний Новгород, ФБГОУ ВО "НГУ им. Р.Е. Алексеева". - № 2021134901; заявл. 29.11.2021; опубл. 04.05.2022, Бюл. № 13. - 7 с: ил.

11. Способ изготовления керамических форм для литья по выплавляемым моделям: пат. 2697678 Рос. Федерация: МПК В22С 1/00 Белов В. Д., Фадеев А. В., Фоломейкин Ю. И., Колтыгин А. В., Никифоров П. Н.; заявитель и патентообладатель Москва, ФГАОУ ВО "НИТУ "МИСиС". - № 2018144662; заявл. 17.12.2018; опубл. 17.12.2018, Бюл. № 23. - 8 с: ил.

12. Способ удаления выжигаемой полимерной модели из керамической формы в литье по выплавляемым моделям: пат. 2772531 Рос. Федерация: МПК В22С 9/04, В22С 7/02 Шилов А.В.; заявитель и патентообладатель Пермь, АО "ОДК - Авиадвигатель". - № 2021138594; заявл. 24.12.2021; опубл. 23.05.2022, Бюл. № 15. - 8 с: ил.

13. ГОСТ 1497-1984 Металлы. Методы испытаний на растяжения. - М.: Изд-во стандартов, 1984. - 44 с.

14. ГОСТ 9454-1978 Металлы. Методы испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. - М.: Изд-во стандартов, 2002. - 12 с.

15. ГОСТ 34518-2019 Печи промышленные и агрегаты тепловые. Правила организации и производства работ, контроль выполнения и требования к результатам работ. - М.: Изд-во стандартов, 2019. - 66 с.

16. ГОСТ 977-1988 Отливки из стали. Общие технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 1988. - 36 с.

17. ГОСТ 33366-2015 Пластмассы. Условные обозначения и сокращения. Часть 1. Основные полимеры и их специальные характеристики. - М.: Изд-во стандартов, 2016. - 72 с.
18. ГОСТ 15973-1982 Пластмассы. Метод определения золы. - М.: Изд-во стандартов, 1982. - 5 с.
19. ГОСТ 23683-2021 Парафины нефтяные твердые. Технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 2023. - 24 с.
20. ГОСТ 6484-1996 Кислота стеариновая техническая. Стеарин. - М.: Изд-во стандартов, 1997. - 16 с.
21. ГОСТ 21179-2000 Воск пчелиный. Технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 2011. - 18 с.
22. ГОСТ 21014-1988 Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности. - М.: Изд-во стандартов, 1989. - 62 с.
23. ГОСТ 2138-1991 Пески формовочные. Общие технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 2005. - 8 с.
24. ГОСТ 26371-1984 Этилсиликат-40. Технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 1994. - 18 с.
25. ГОСТ Р 51232-1998 Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. - М.: Изд-во стандартов, 2010. - 18 с.
26. ГОСТ 8433-1981 Вещества вспомогательные ОП-7 и ОП-10. Технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 1981. - 12 с.
27. ГОСТ 3118-1977 Кислота соляная. Технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 1997. - 14 с.
28. ГОСТ 2184-2013 Кислота серная техническая. Технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 2019. - 40 с.
29. ГОСТ 2850-1977 Картон асбестовый. Технические. - М.: Изд-во стандартов, 1995. - 11 с.
30. ГОСТ 13078-2021 Стекло натриевое жидкое. Технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 2021. 23 с.

31. ГОСТ 2133-1975 Опоки литейные. Типы и основные размеры. - М.: Изд-во стандартов, 1976. - 11 с.
32. ГОСТ 2787-1977 Металлы черные вторичные. Общие технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 2002. - 52 с.
33. ГОСТ 4832-1995 Чугун литейный. Технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 2004. - 7 с.
34. ГОСТ 1415-1993 Ферросилиций. Технические требования и условия поставки. - М.: Изд-во стандартов, 2005. - 11 с.
35. ГОСТ 4755-1991 Ферромарганец. Технические требования и условия поставки. - М.: Изд-во стандартов, 2006. - 8 с.
36. ГОСТ 19200-1980 Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов. - М.: Изд-во стандартов, 2004. - 12 с.
37. ГОСТ 5640-1968 Сталь. Металлографический метод оценки микро-структуры листов и ленты. - М.: Изд-во, 1988. - 17 с.

Приложения



ФГБОУ ВО
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра: «Сварочное, литейное производство и
материаловедение»

Магистерская диссертация
на тему: «Исследование структуры и свойств отливок,
полученных методом литья по выжигаемым моделям»

Магистрант: гр. 21МТм1 Куранов А.С.

Научных руководитель: к.т.н., доцент Логинов О.Н.

Пенза 2023 г.

Цель и задачи диссертации

Целью магистерской диссертации является разработка комбинированной технологии литья с применением выжигаемых моделей отливок, изготовленных по *FDM*-технологии, и выплавляемых моделей литниково-питающей системы, изготовленных по традиционной технологии в пресс-формах.

Для достижения обозначенной цели были поставлены следующие задачи:

- провести литературно-патентный обзор по данной теме;
- выбрать материал, наиболее подходящий для изготовления выжигаемых моделей по *FDM* технологии;
- отработать технологию изготовления моделей литниковой-питающей системы из легкоплавкой смеси;
- отработать технологию изготовления керамических форм;
- изготовить опытную партию стальных отливок,
- изучить химический состав и механические свойства, исследовать микроструктуру полученных отливок.

Актуальность

Актуальностью работы связана с тем, что комбинированная технология литья, сочетающая в себе изготовление выжигаемых моделей отливок по *FDM*-технологии с изготовлением элементов ЛПС из легкоплавкой смеси, в условиях единичного и мелкосерийного производства на предприятиях имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционной технологией производства, а именно:

- отсутствие необходимости изготовления дорогостоящей оснастки;
- снижение себестоимости изделий;
- возможность изготовления сложных по конфигурации отливок.

Проектирование 3D-моделей отливок в *SolidWorks*

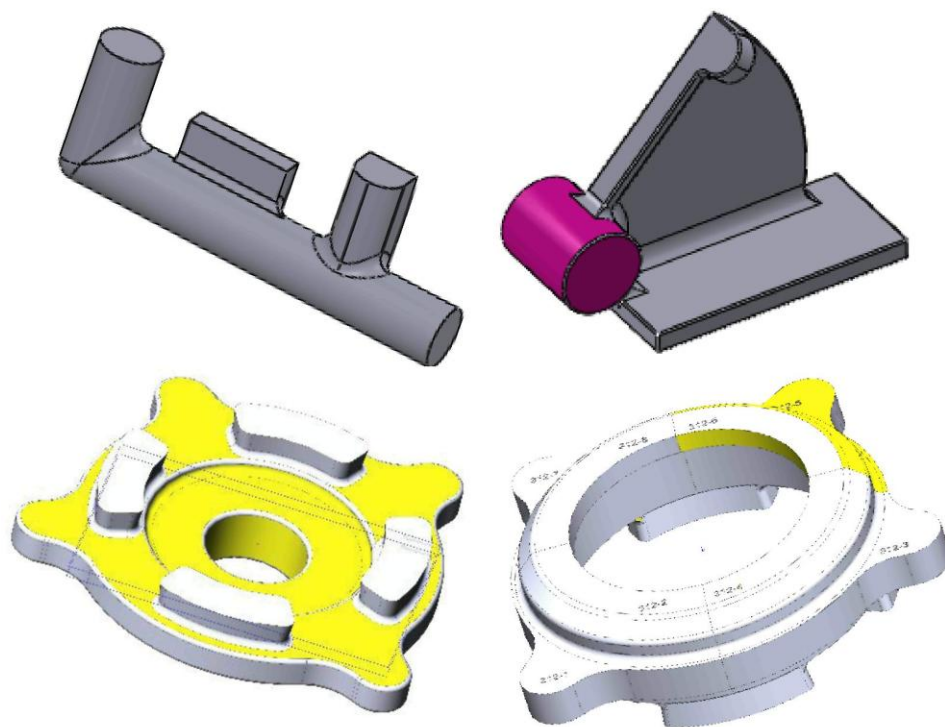


Рисунок 1 – 3D-модели отливок

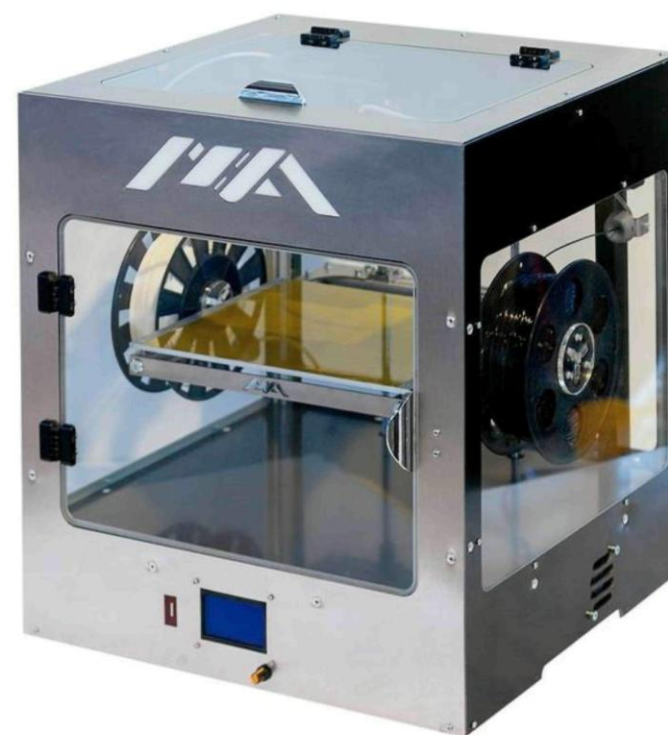


Рисунок 2 – 3D-принтер Альфа 2

Выбор материалы для 3D-печати



Рисунок 3 – Образцы для определения зольности

Таблица 1 – Результаты испытаний

Материал образца	Масса образца, г	Масса остатков сгорания, г
АБС	23,227	0,0495
ПЛА	25,94	0,12

Сборка модельных блоков

Модель литниково-питающей системы фиксируется в перпендикулярном положении, к ней припаивается модель коллектора, а потом уже и полимерная модель отливки

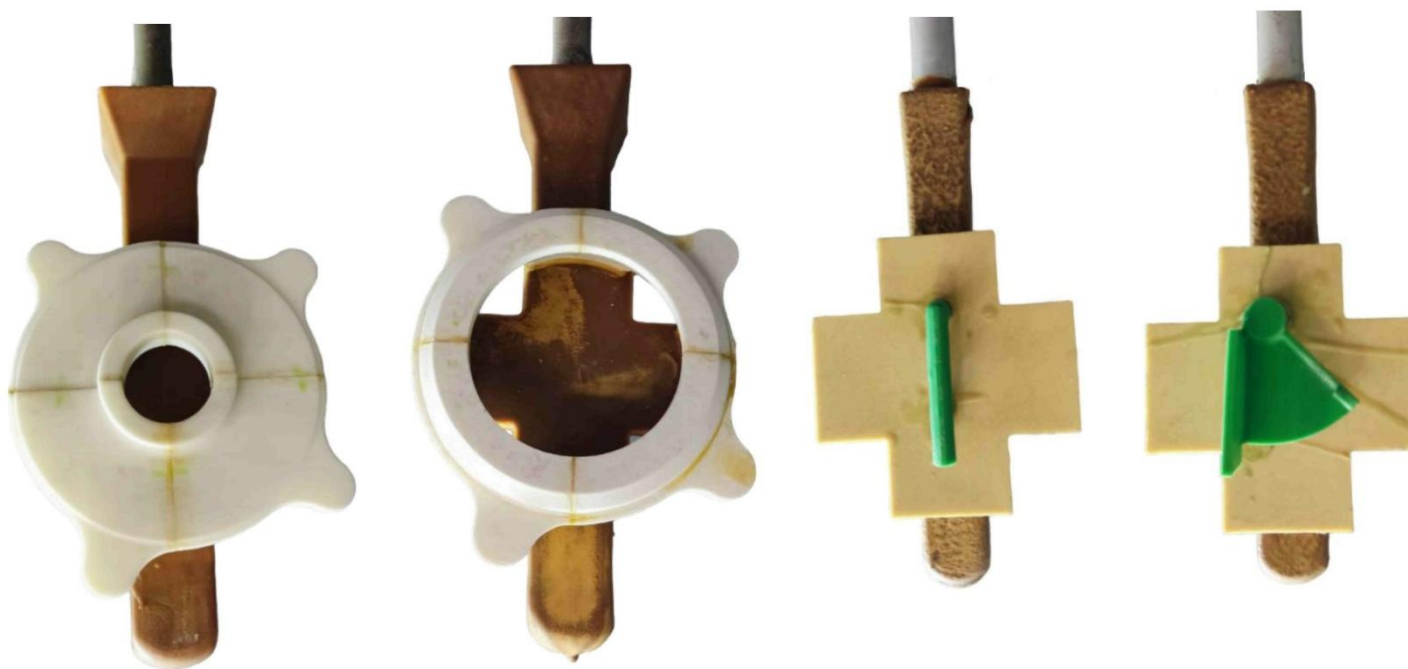


Рисунок 4 – Собранные модельные блоки

Изготовление керамических форм

Таблица 2 – Состав огнеупорного покрытия

Наименование компонента	Количество
Этилсиликат ГОСТ 26371-1984, л	15,0
Вода водопроводная ГОСТ Р 51232-1998 , л	14,0
Вспомогательное вещество ОП-7 или ОП-10 ГОСТ 8433-1981, г	60,0
Соляная кислота ГОСТ 3118-1977, л	0,5
Серная кислота ГОСТ 2184-2013 , л	0,18
Пылевидный кварц ГОСТ 2138-1991, кг	65,0...70,0



Рисунок 5 – Керамические формы перед выплавкой модельного состава

Выжигание моделей из керамических форм

Режим выжигания моделей:

- нагрев с 20 до 350 °С, скорость нагрева от 120 до 150 °С/час;
- выдержка при температуре 350 °С в течение 2 часов;
- нагрев с 350 до 720 °С, скорость нагрева от 120 до 150 °С/час;
- выдержка при температуре 720 °С в течение 2 часов.

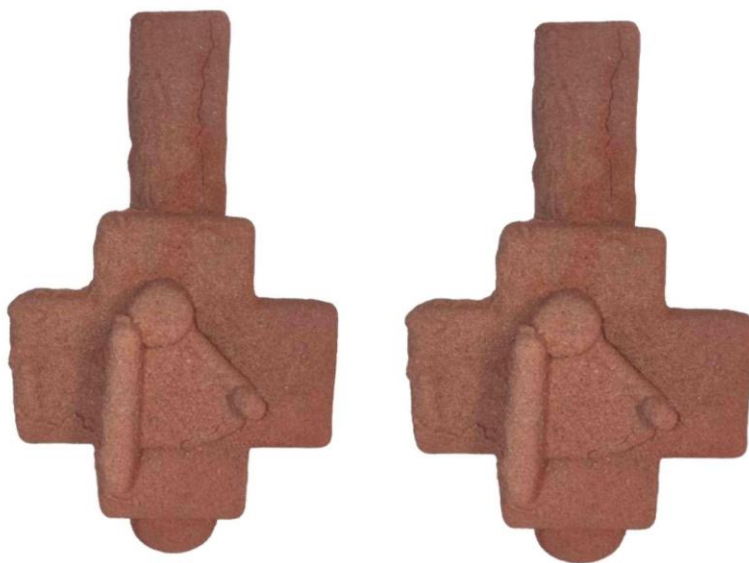


Рисунок 7 – Керамические формы после выжигания моделей и прокали



Рисунок 8 – Керамическая форма под образцы для определения химического состава и механических свойств после выжигания моделей и прокали

Схема технологии литья по выжигаемым моделям

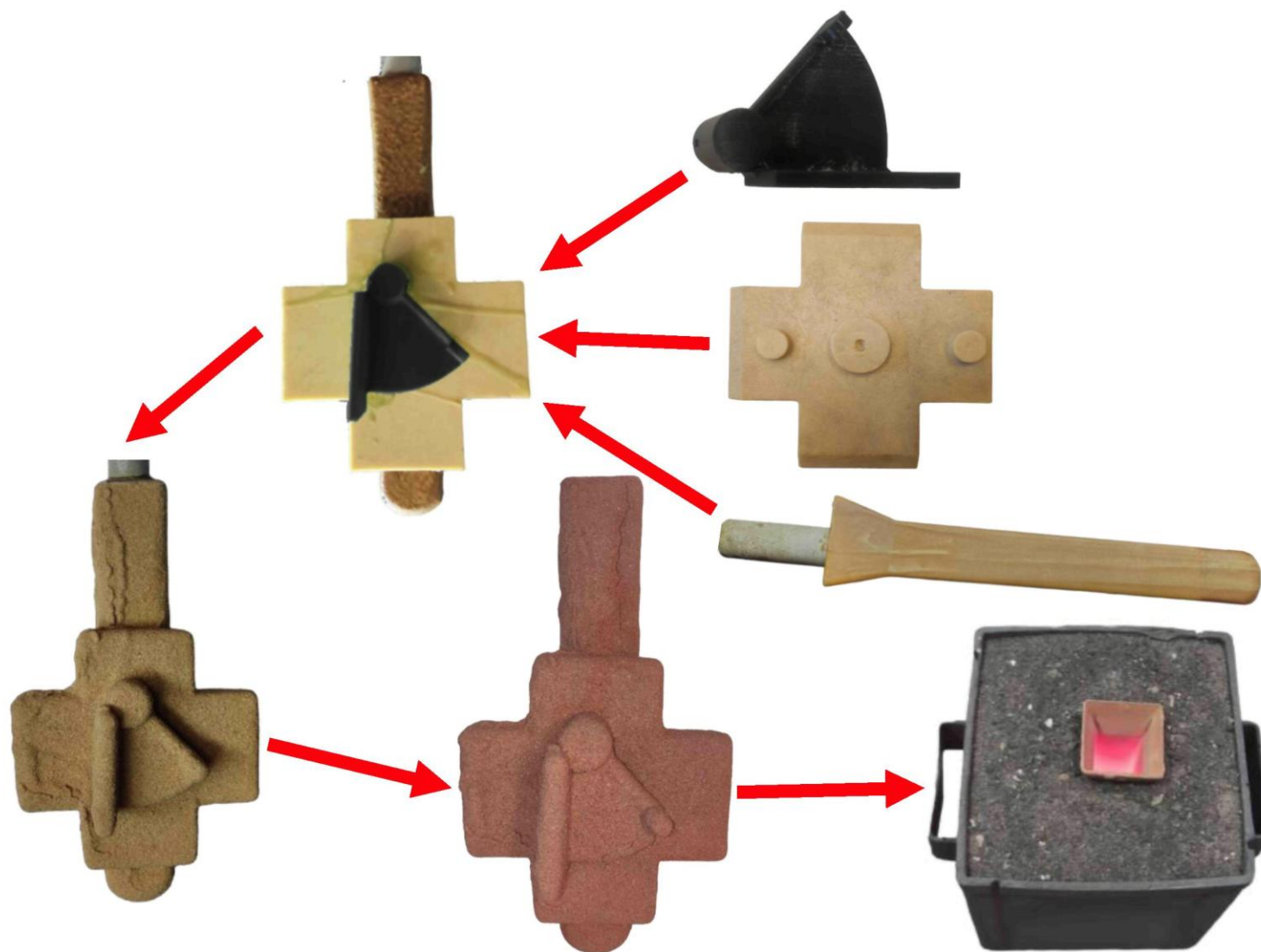


Рисунок 6 – Схема процесса литья по выжигаемым моделям

Визуальный контроль качества отливок



Рисунок 9 – Крупная газовая раковина на поверхности отливки

Модель литниково-питающей системы дополняется воздушными каналами и выпорами для улучшения удаления несгоревшей массы полимеров и продуктов сгорания.

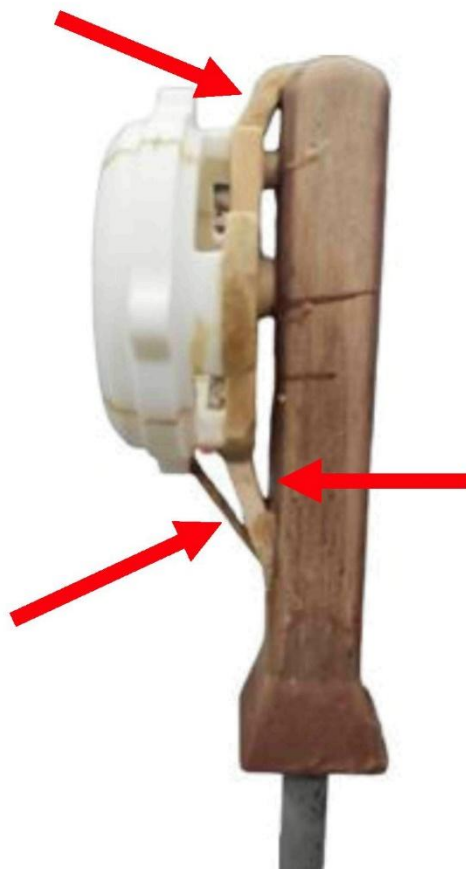


Рисунок 10 – Модель литниково-питающей системы дополнена воздушными каналами и выпорами

С учетом вышеуказанных изменений в технологическом процессе, методом литья по выжигаемым моделям, получены опытные отливки из стали 35Л.



Рисунок 11 – Отливки после обрезки литниково-питающей системы

Механическая и термическая обработка отливок

Для отливок из стали 35Л используются следующие режимы термической обработки: нормализация при 860 °С и отпуск при 630 °С

Стальные отливки, после термической обработки, проходят через дробеструйную обработку, затем зачищаются от облоя и заусенцев заподлицо.



Рисунок 12 – Отливка после зачистки

Анализ химического состава стали 35Л



Рисунок 13 – Оптико-эмиссионный спектрометр *Foundry-Master Lab Pro*



Рисунок 2 – Шлифовально-полировальный станок *Saphir 560*

Таблица 3 – Результаты химического анализа стали 35Л

С	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	S	P
не более							
0,40	0,90	0,52	0,30	0,30	0,30	0,045	0,04

Определение механических свойств стали 35Л



Рисунок 14 – Образец для механических испытаний на разрыв



Рисунок 15 – Образец для механических испытаний на ударную вязкость

Таблица 3 – Результаты механических испытаний стали 35Л

Параметр	Значение
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	279,0
Предел прочности σ_B , МПа	495,0
Относительное удлинение δ_5 , %	16,0
Относительное сужение Ψ , %	26,0
Ударная вязкость, Дж/см ²	35,1



Рисунок 16 – Настольная испытательная машина *Galdabini Quasar 50*

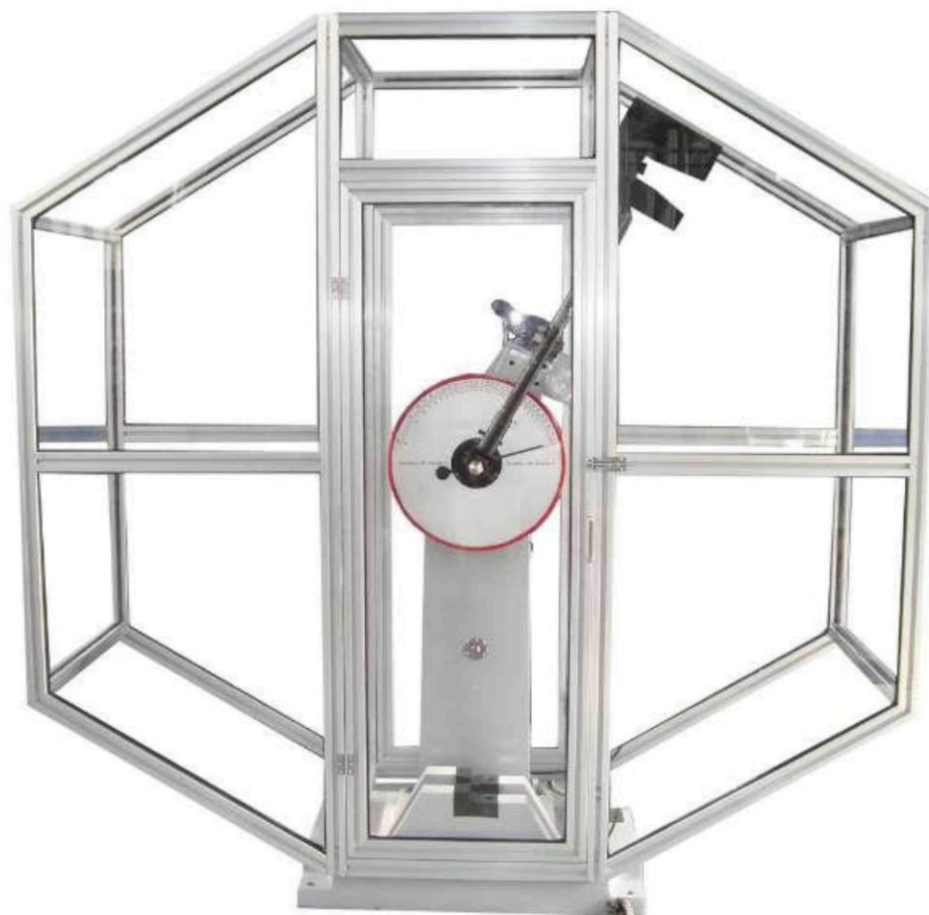


Рисунок 17 – Маятниковый копёр *Jinan TE JBW-300*

Анализ микроструктуры стали 35Л

17



Рисунок 18 – Анализатор изображения *Thixomet SmartDrive*

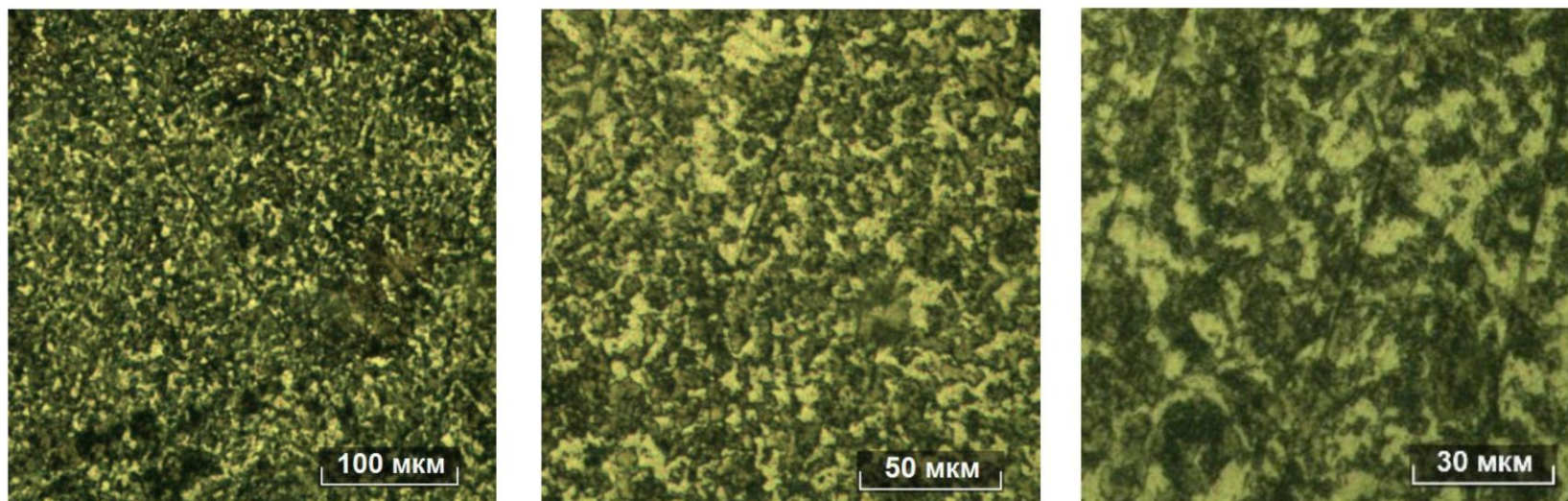


Рисунок 19 – Микроструктура стали 35Л после нормализации при 860 °С и отпуска при 630 °С при увеличении 100×, 200× и 500×

Основные выводы

Показано, что наиболее пригодным для построения полимерных моделей отливок по *FDM*-технологии для литья по выжигаемым моделям является АБС пластик. Этот пластик имеет меньшую массу продуктов сгорания $m = 0,0495$ г, в сравнении с ПЛА $m = 0,12$ г.

Отработана технология изготовления моделей литниковой-питающей системы из легкоплавкой смеси, а также технология изготовления керамических форм.

В результате работы удалось получить опытные отливки из стали 35Л, удовлетворяющие требованиям ТЗ.

Химический состав и результаты механических испытаний стали 35Л соответствуют требованиям ГОСТ 977-1988: $\sigma_{0,2} = 279$ МПа; $\sigma_B = 495$ МПа, $\delta_5 = 16$ %, $\Psi = 26$ %, $KCU = 35,1$ Дж/см².

Проведен микроструктурный анализ стали 35Л после нормализации при 860 °С и отпуска при 630 °С, в результате которого выявлено, что сталь 35Л имеет феррито-перлитную структуру, соотношение перлита к ферриту 40 к 60 %.

Таким образом, цель, определенная в магистерской диссертации, достигнута, все поставленные задачи решены.

Публикации

1. Куранов А.С. Влияние зольности материала модели на качество отливок, получаемых при литье по выжигаемым моделям [Электронный ресурс] / Куранов А.С. // Теория и практика современной науки. - 2023. - №6(96). - Режим доступа: clck.ru/34oJ5i

2. Куранов А.С. Получение керамического огнеупорного покрытия на основе этилсиликата [Электронный ресурс] / Куранов А.С. // Теория и практика современной науки. - 2023. - №6(96). - Режим доступа: clck.ru/34oJBW

Спасибо за внимание!