

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС»

На правах рукописи

Качалов Алексей Юрьевич

Исследование процесса формирования крупногабаритных титановых
отливок для летательных аппаратов в графитовых литейных формах и
разработка безмодельной технологии их изготовления

Шифр и наименование научной специальности: 05.16.04 – «Литейное
производство»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель: профессор, д.т.н. Белов Владимир Дмитриевич

Москва – 2021

Содержание

Введение.....	4
1. Аналитический обзор литературы	12
1.1 Особенности получения крупногабаритных тонкостенных отливок и анализ материалов для изготовления литейных форм	12
1.1.1. Титан и его сплавы.....	12
1.1.2. Структура титановых сплавов	16
1.1.3. Способы литья крупногабаритных тонкостенных титановых отливок.....	17
1.1.4. Графит: марки, физико–механические свойства	20
1.1.5. Клей для соединения и ремонта графитовых форм.....	26
1.2 Моделирование процессов литья и затвердевания отливок в СКМ ЛП «Procast»	28
1.3 Жидкотекучесть сплава ВТ20Л в графитовой форме.....	29
1.4 Шероховатость поверхности титановых отливок и литейных форм.....	33
1.5 Альфированный слой	34
1.7 Постановка научной задачи и частные задачи исследования.....	37
2. Методики проведения экспериментов.....	39
2.1 Методика определения коэффициента теплопередачи между формой из графита ГМЗ и отливкой из сплава ВТ20Л	39
2.1.1. Методика изготовления графитовой формы	39
2.1.2. Методика приготовления расплава ВТ20Л, получения отливки и записи температур формы и отливки.....	40
2.1.3. Методика определения химического состава сплава	42
2.1.4. Методика моделирования процесса заливки и затвердевания отливки в СКМ ЛП «ProCast».....	43
2.2 Методика определения жидкотекучести сплава ВТ20Л	44
2.3 Методика проведения эксперимента по разработке клеевых составов ..	46
2.4 Методика получения опытной отливки	48
2.5 Методика изучения шероховатости отливки и литейной формы для изготовления отливки	52

2.6	Методика изучения альфированного слоя и механических свойств отливки	54
2.7	Методика определения точности отливки, полученной по безмодельной технологии	55
3.	Результаты исследования моделирования процесса литья и разработка технологии изготовления опытных крупногабаритных отливок из сплава BT20L	56
3.1	. Результаты экспериментов по определению коэффициента теплопередачи.....	56
3.2	Результаты измерения жидкотекучести	63
3.3	Результаты моделирования процесса литья опытных отливок	65
3.4	Разработка конструкции литейных форм для опытных отливок	71
3.5	Результаты экспериментов по разработке клеевых составов	73
3.6	Изготовление графитовых форм	80
3.7	Результаты изучения шероховатости поверхности графитовых форм..	82
4.	Результаты изготовления опытных отливок и исследования их взаимодействия с формой	85
4.1	Изготовление опытных отливок.....	85
4.2	Анализ шероховатости поверхности отливок и форм после заливки....	86
4.3	Анализ поверхности графитовой формы после заливки	94
4.4	Структура сплава в опытных отливках	102
4.5	Результаты экспериментов по изучению взаимодействия титановой отливки с материалом формы	103
5.	Результаты определения размерной точности опытных отливок	113
	Общие выводы.....	119
	Список использованных источников	121
	Приложение 1	134
	Приложение 2	143

Введение

Аэрокосмическая отрасль играет большую роль в развитии любого государства, так как требует комплексной работы огромного количества предприятий разной специализации. В связи с этим Правительством Российской Федерации были утверждены государственные программы «Космическая деятельность России на 2013–2020 годы», «Развитие авиационной промышленности на 2013–2025 годы». В 2008 году началась разработка первого за последние 30 лет турбовентиляторного двигателя ПД–14. Следом началась разработка двигателя ПД–35.

На протяжении нескольких последних десятилетий неоднократно запускались программы модернизации бомбардировщиков Ту–160. Несколько лет назад приняли решение о возобновлении производства таких самолетов. Однако у всех этих программ и планов было слабое место – отсутствие производства двигателей НК–32. Планируя развитие дальней авиации, приходилось полагаться только на имеющиеся складские запасы [1]. Таким образом в России на ближайшие годы взят курс на развитие авиационной промышленности.

Одним из основных конструкционных материалов для современных газотурбинных двигателей являются титановые сплавы, обладающие рядом преимуществ перед другими материалами. Несмотря на то, что титан был открыт в 1791г. 28–ми летним английским монахом Вильямом Грегором в минерале менакканите, только в середине прошлого, XX века металлурги, технологи и конструкторы обратили внимание на новый металл с особыми химическими, физическими, механическими и «экзотическими» свойствами. Поскольку титан к тому же довольно распространен в природе (по распространенности он уступает только алюминию, железу и магнию), то в 1950–1960–х годах, по крайней мере, в рекламной литературе, появилась масса статей: «Титан — металл будущего», «Титан — металл века», «Титан заменит все металлы». Однако извлечение достаточно чистого титана из руд, получение из него полуфабрикатов и изделий оказалось чрезвычайно

сложными задачами. В итоге он в значительной мере потерял первоначальный ореол всеобщего победителя и постепенно занял свое место среди других конструкционных материалов, но это место весьма значимо и почетно [2].

Прогресс технологий и высокая стоимость топлива создают тенденцию разработки более сложных и легких конструкций двигателей. Для получения литых деталей для них традиционно применяют и титановые сплавы, отливки из которых в настоящее время преимущественно изготавливают литьём в керамические и графитовые формы, получаемые спеканием [3]. Следует отметить, что применение этих способов литья для получения крупногабаритных, тонкостенных и высокой размерной точности отливок вызывает большие трудности. Кроме этого, они имеют химически вредные процессы, требуют применения сложного комплекса оборудования и длительной подготовки производства для каждого конкретного изделия. К тому же после травления литой поверхности и механической обработки вскрываются внутренние дефекты на отливках, присущие титану. В этом случае горячее изостатическое прессование (ГИП) [4] для их исправления бесполезно, а заварки только ухудшают поверхность. Из-за отсутствия литой поверхности детали не держат определенных видов нагрузок.

Метод литья по безмодельной технологии может служить заменой классических, традиционно применяемых, способов получения крупногабаритных тонкостенных титановых отливок сложной конфигурации, обеспечивая большой выход годного литья и сокращая сроки освоения производства новых отливок. К тому же он основан на применении отечественных материалов, обеспечивая импортонезависимость технологии. Литейные формы изготавливаются из прессованного в блоки графита путем фрезерной и токарной обработки. Для реализации этой технологии используются серийные станки с ЧПУ, что будет способствовать быстрому переходу на эту технологию. Инертный и прочный материал формы должен обеспечивать стабильную геометрию отливки, что позволит обходиться без травления для получения нужной толщины стенки отливки.

Однако в России для литья таких отливок этот метод не использовался, а в иностранных литературных источниках информация скудна и дана для импортных материалов. В связи с этим отсутствуют надежные научно обоснованные и систематизированные данные о процессе получения титановых отливок при литье в графитовые формы. А без них невозможно разработать технологию изготовления ответственной отливки. К тому же в последнее время эмпирические методы расчета, применяемые для решения этой задачи, всё чаще заменяют методами компьютерного моделирования, которые используют данные теплофизических свойств и граничных условий тепломассопереноса. Эти данные также неполны и требуют экспериментального определения. Их изучение и определение играет важную роль, так как растущие вычислительные мощности современных компьютеров позволяют получать результаты, приближающиеся к реальным, полученным в производственных условиях, что дает возможность объективно оценивать технологичность отливок и качество принятых технологических решений.

Скудна информация о качестве поверхностного слоя получаемых литых деталей и их структуре. Ведь титан активно взаимодействует практически со всеми известными элементами и соединениями, что чаще всего приводит к ухудшению его эксплуатационных свойств. Поэтому нужно обращать особое внимание на взаимодействие на границе металл–форма.

Данная диссертация посвящена научно–техническим проблемам разработки и совершенствования технологии изготовления крупногабаритных отливок ответственного назначения из титановых сплавов в графитовые формы.

Одним из аспектов этой работы является изучение взаимодействия между расплавом и литейной формой в процессе формирования отливки, а также определение граничных условий при теплофизическом взаимодействии металл–форма для моделирования процесса литья. Это приведет к сокращению времени разработки и совершенствования технологии изготовления литых деталей ответственного назначения из титановых сплавов

и уменьшит затраты на получение первых комплектов отливок для опытных изделий новой техники.

Актуальность работы подтверждается выполнением ее в соответствии с тематическими планами университета на НИР и ОКР по следующему проекту:

- договор от «21» ноября 2012 г. № 40/10-30958 по теме «Разработка технологии производства высоконагруженных крупногабаритных тонкостенных деталей из титановых сплавов для авиационно-космического турбиностроения» в рамках Постановления Правительства Российской Федерации № 218. Договор между ОАО «УМПО» и Минобрнауки РФ от «12» февраля 2013 г. № 02.G25.31.0009 (см. Приложение 1).

Цель и задачи работы:

Целью настоящей работы является разработка и исследование безмодельной технологии изготовления крупногабаритных тонкостенных отливок из сплава ВТ20Л. Для достижения этой цели решались следующие задачи:

1. Анализ свойств графитовых материалов для обоснования и выбора материала для изготовления литейных форм, а также разработка способов ремонта и крепления её элементов.
2. Теоретическое и экспериментальное исследование кристаллизации сплава ВТ20Л в графитовой форме и вычисление коэффициента теплопередачи для математического моделирования процесса литья.
3. Исследование литейных свойств сплава ВТ20Л применительно к литью по безмодельной технологии и оценка качества получаемых отливок.
4. Исследование структуры сплава ВТ20Л и определение размерной точности в отливках, получаемых по безмодельной технологии.

Научная новизна:

1. Экспериментально установлено отсутствие альфированного слоя при литье сплава ВТ20Л в графитовые формы из малозольного графита, что обусловлено образованием на начальном этапе процесса литья твёрдой корки

на поверхности раздела металл–форма и отсутствием прямого контакта жидкого расплава с формой в процессе последующего её заполнения.

2. Установлена закономерность изменения коэффициента теплопередачи между графитовой формой и отливкой из сплава BT20Л в зависимости от температуры на её поверхности в процессе литья, показывающая, что наиболее интенсивный отвод тепла ($h = 530 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) от отливки к литейной форме происходит до достижения температуры ликвидуса сплава на поверхности отливки. После этого происходит резкое падение коэффициента теплопередачи ($h = 70 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) в процессе затвердевания отливки и дальнейшее его снижение за счёт образования зазора между отливкой и формой.

3. Предложен метод расчета величины шероховатости поверхности отливки из сплава BT20Л в элементах различного сечения при литье в графитовые формы из блочного малозольного графита.

4. Экспериментально определена величина линейной усадки сплава BT20Л на наружных и внутренних поверхностях графитовой формы, оформляемых стержнями, составляющая 0,7–0,8 % и 0,2–0,3% соответственно.

Практическая значимость:

1. Предложен способ литья в графитовые формы, который может служить заменой классических, традиционных способов получения титановых отливок сложной конфигурации, обеспечивая больший выход годного литья и коэффициент использования металла по сравнению с ними. Создан научно–технический задел производства крупногабаритных тонкостенных отливок из титановых сплавов для аэрокосмической отрасли методом литья по безмодельной технологии.

2. Расширена база данных программы «ProCast» значениями коэффициента теплопередачи, рассчитанными с помощью эксперимента, позволяющими с большей точностью моделировать процесс получения титановых отливок методом литья в графитовые формы.

3. Разработаны клеевые составы на базе пульвербакелита и бакелитового лака для ремонта и соединения элементов графитовых форм.

4. Определена размерная точность отливок из титановых сплавов, которую позволяет получать метод литья по безмодельной технологии – шестой класс точности при номинальном размере 1000–1600 мм.

5. Произведена оценка жидкотекучести сплава BT20Л при литье в стальные и графитовые формы. Установлено, что при литье в графитовые формы её значение на 40% меньше.

6. Получены опытные отливки «Стойка» и «Втулка» из сплава BT20Л, полностью соответствующие требованиям конструкторской документации.

Апробация работы:

Основные положения научной работы докладывались и обсуждались на конференциях:

1. Доклады «Изучение влияния материала формы на качество отливок из титановых сплавов, полученных методом литья по безмодельной технологии» и «Особенности изготовления деталей из титановых сплавов методом литья в графитовые формы, изготовленные фрезерованием» на IX международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии», Москва, НИТУ «МИСиС», 2017;

2. Доклад «Ускоренный запуск в производство крупногабаритных тонкостенных отливок из титановых сплавов для аэрокосмической отрасли с использованием цифровых технологий» на IX Всероссийской научно-технической конференции молодых специалистов, Уфа, ПАО «ОДК-УМПО», 2018;

3. Доклад «Определение коэффициента теплопередачи между отливкой из сплава BT20Л и графитовой формой» на Всероссийской научно-технической конференции «Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и антикоррозионной защиты легких сплавов», Москва, ФГУП «ВИАМ», 2019;

4. Доклад «Исследование жидкотекучести титанового сплава ВТ20Л» на X международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии», Москва, НИТУ «МИСиС», 2020.

Публикации:

По результатам научной работы опубликовано 10 печатных работ, в том числе 5 статей из списка рекомендованных ВАК изданий и 5 статей из списка изданий, включенных в РИНЦ:

1. Bazhenov V. E., Fadeev A.V., Koltygin A.V., Kachalov A.Yu., Komissarov A.A., Sannikov A. V. Glue for Joints and Repair of Elements of Graphite Molds // Polymer Science. – Series D, 2017. – Vol. 10, No. 1. – pp. 4–8;

Клей для соединения и ремонта элементов графитовых литейных форм / В. Е. Баженов, А. В. Фадеев, А. В. Колтыгин [и др.] // Клеи. Герметики. Технологии. – 2016. – № 5. – С. 6–11;

2. Белов В. Д., Фадеев А. В., Павлинич С.П., Качалов А. Ю., Гамазина М.В., Аликин П.В. Влияние материала литейной формы на качество отливки из титановых сплавов // Литейщик России. – 2015. – №3. – 2015. – С.19–26;

3. Белов В. Д., Фадеев А.В., Петровский П.В., Павлинич С.П., Аликин П.В., Качалов А.Ю. Некоторые аспекты применения литейных форм из неметаллических материалов, изготовленных на базе цифровых технологий // Литейщик России. – 2015. – №5. – С.20–23;

4. Белов В.Д., Качалов А.Ю., Павлинич С.П., Аликин П.В. Исследование влияния параметров литья на шероховатость поверхности крупногабаритных тонкостенных отливок из титанового сплава ВТ20Л при литье по безмодельной технологии // Литейщик России. – 2016. – № 7. – С.10–16;

5. Качалов А. Ю., Белов В. Д., Баженов В. Е., Фадеев А. В. Изучение влияния материала формы на качество отливок из титановых сплавов, полученных методом литья по безмодельной технологии// Цветные металлы – 2019. – №6. С.84–90;

Understanding the effect of the mould material on the quality of investment titanium alloy castings / Kachalov, A.Y., Belov, V.D., Bazhenov, V.E., Fadeev, A.V. // *Tsvetnye Metally*, 2019, 2019(6), стр. 84–91;

6. Качалов А.Ю., Белов В.Д., Фадеев А.В. Изучение влияния материала формы на качество отливок из титановых сплавов, полученных методом литья по безмодельной технологии / В сборнике: Прогрессивные литейные технологии: Труды IX Международной научно–практической конференции (13–17 ноября 2017 года). Под редакцией проф. В.Д. Белова и проф. Батышева А.И. – 2017. – С.156–160;

7. Баженов В.Е., Фадеев А.В., Санников А.В., Качалов А.Ю., Колтыгин А.В., Асеева С.С., Белов В.Д. Особенности изготовления деталей из титановых сплавов методом литья в графитовые формы, изготовленные фрезерованием // В сборнике: Прогрессивные литейные технологии: Труды IX Международной научно–практической конференции (13–17 ноября 2017 года). Под редакцией проф. В.Д. Белова и проф. Батышева А.И. – 2017. – С.204–210;

8. Качалов А.Ю., Баженов В.Е., Белов В.Д., Матвеев С.В., Фадеев А.В. Определение коэффициента теплопередачи между отливкой из сплава ВТ20Л и графитовой формой // Материалы конференции: Всероссийская научно–техническая конференция "Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и антикоррозионной защиты легких сплавов", ФГУП "ВИАМ". – М.: ВИАМ.

1. Аналитический обзор литературы

1.1 Особенности получения крупногабаритных тонкостенных отливок и анализ материалов для изготовления литейных форм

1.1.1. Титан и его сплавы

За последние 20 лет научный и промышленный интерес к применению титановых сплавов возрастает больше, чем к любому материалу в истории металлургии. Это объясняется тем, что титановые сплавы имеют превосходные свойства, такие как низкая плотность ($4,5 \text{ г/см}^3$), высокая удельная прочность, трещиностойкость, коррозионная стойкость. Максимальные рабочие температуры некоторых титановых сплавов составляют 550°C , и, как ожидается, достигнут 700°C [5].

Подтверждением широкого распространения в разных областях техники деталей из титановых сплавов являются корпусные части авиадвигателей, шасси самолетов, навигационных приборов, трубы теплообменных аппаратов и даже головки клюшек для гольфа. Благодаря своим физико-механическим свойствам, коррозионной стойкости, биосовместимости титановые сплавы находят применение в производстве биомедицинских имплантов, в том числе имплантов зубов, тазобедренных суставов, которые во многих случаях обеспечивают сохранность человеческой жизни и ее удобство. Эти весьма успешные приспособления появляются благодаря практическому освоению технологий плавки титановых сплавов и обработки заготовок. Но основным препятствием на пути широкого распространения титановых сплавов является их стоимость и стоимость технологического оборудования, предназначенного для работы с ними [6,7,8].

Титан – металл серебристо-белого цвета, который обладает высокой температурой плавления 1668°C и кипения 3169°C , имеет две аллотропные

модификации. Низкотемпературная α -модификация существует до 882,5 °С, обладает гексагональной плотноупакованной решеткой. Высокотемпературная β -модификация устойчива от 882,5 °С. Способность манипулировать этими модификациями за счет легирования определяет стабильность и физико-механические характеристики этих двух фаз.

Легирующие элементы титановых сплавов по степени их влияния на фазовый состав классифицируются как нейтральные (Zr, Sn и др.), α -стабилизаторы (Al, C, N, O) и β -стабилизаторы (Mo, V, Fe, Cr, Mn, H, Ni). α -стабилизаторы повышают температуру β -перехода, β -стабилизаторы понижают эту температуру [9].

Получаемый в промышленных масштабах чистый титан содержит некоторое количество примесей, таких как азот, водород, кислород и железо.

Титановые сплавы наиболее часто классифицируют по фазовому составу. Так выделяют α -сплавы, псевдо- α -сплавы, ($\alpha+\beta$)-сплавы, β -сплавы, псевдо- β -сплавы, сплавы на основе интерметаллидов.

Однофазные α -сплавы широко используются в приспособлениях, которые не требовательны к прочности, но к которым предъявляются серьезные требования по коррозионной стойкости. Обладают достаточными высокотемпературными свойствами, но термообработка с целью изменения микроструктуры для коррекции свойств неприменима. К этой группе относятся такие сплавы как BT1-00, BT1-0, BT5, BT5-1, ряд зарубежных сплавов Ti-5Al-5Sn-5Zr, Ti-6Al-4Zr-1V и др. [10].

Двухфазные $\alpha+\beta$ -сплавы обладают высокими прочностными свойствами и твердостью. Данные свойства сохраняются при высоких температурах, что делает эти сплавы привлекательными в широком диапазоне изделий аэрокосмической техники, где требуются сохранение прочностных свойств до 500 °С. В своем составе имеют 4–16 % β -стабилизаторов. При комнатной температуре в своей структуре имеют 10–20 % β -фазы. К этой группе относятся сплавы марок BT6С, BT3-1, BT14, BT16, BT21, зарубежные сплавы Ti-6Al-4V, Ti-4Al-3Mo-1V, Ti-4Al-4Mn и др.

Металлургия β -сплавов позволяет разрабатывать композиции и режимы термообработки, которые обеспечивают сочетание в сплавах одновременно высокой прочности и вязкости, что требуется в авиаконструкциях или при получении биосовместимых сплавов с памятью формы и требуемой прочностью для биомедицины. К этим сплавам относятся ВТ15, ТС6, 4200.

Псевдо β -сплавы содержат малое количество α -стабилизаторов и 10–15 % β -стабилизаторов. К ним применяется термообработка, которая позволяет выделить мелко дисперсную α -фазу в β -твердом растворе.

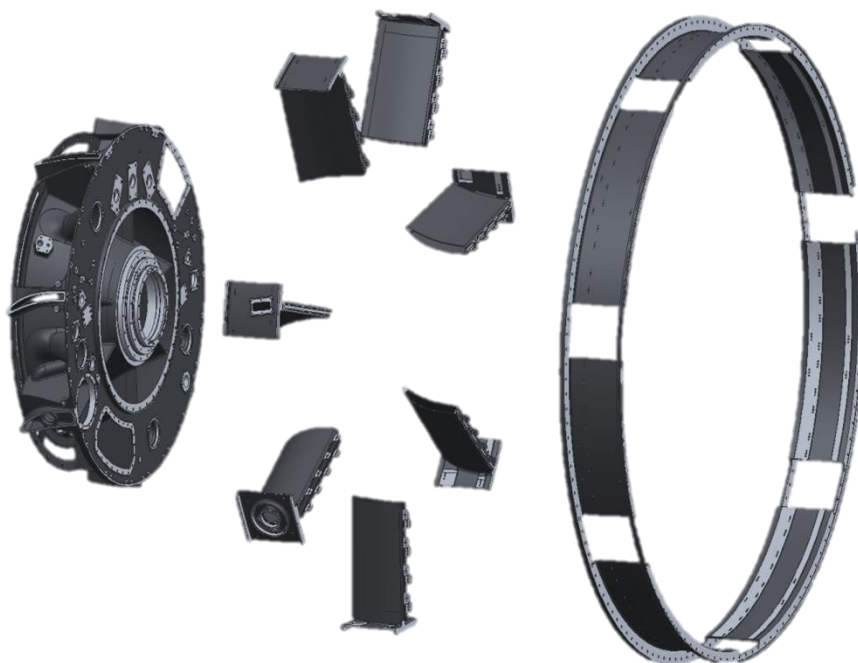
Алюминиды титана воплощают особый класс сплавов с исключительным набором физико-механических свойств. Эти материалы на основе интерметаллического соединения Ti_3Al и $TiAl$ имеют потенциал, чтобы поднять рабочую температуру до 650–800 °С [11, 12].

Псевдо- α -сплавы содержат в своей структуре не более 10 % β -фазы, которая образуется добавлением 1–2 % β -стабилизаторов. Присутствие β -фазы повышает прочность и улучшает обрабатываемость сплавов. На сегодня рабочие температуры этих сплавов достигают 550 °С и они служат для изготовления комплектующих авиационных двигателей. К этой группе относятся сплавы марок ОТ4-0, ВТ4-1, ОТ4, ПТ-3В, ВТ20, а также зарубежные сплавы $Ti-7Al-2Nb-1Ta$, $Ti-6Al-2Nb-1Ta-0,8Mo$ и др.

Из псевдо- α -сплава ВТ20Л конструктора заложили изготовление детали «Корпуса разделительного» двигателя ПД-14, его изображение представлено на рисунке 1. Химический состав и механические свойства сплава представлены в таблицах 1 и 2, соответственно. Это литейный сплав с добавками молибдена, ванадия и циркония. Указанные добавки сообщают сплаву более высокий уровень прочности по сравнению со сплавом ВТ5Л при сохранении хороших литейных характеристик и свариваемости. Он отличается высокой химической стойкостью при температурах до 300–500 °С. Благодаря своим хорошим характеристикам его и используют для изготовления крупногабаритных конструктивных частей авиационных двигателей.



А)



Б)

Рисунок 1– «Корпус разделительный» двигателя ПД–14, а) изделие в сборе, б) детали конструкции.

Таблица 1 – Химический состав ВТ20Л по ОСТ 1 90060–92

Марка сплава	Содержание, массовая доля %											
	Основные компоненты				Примеси, не более							
	Ti	Al	Mo	V	Si	C	Fe	Si	O	N	H	Σ проч.
ВТ20Л	Осн.	5,5 – 7,5	0,5– 2,0	0,8– 1,8	0,15	0,13	0,30	0,15	0,16	0,05	0,01	0,3

Таблица 2 – Механические свойства сплава ВТ20Л по ОСТ 1 90060–92

Марка сплава	Временное сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное		Ударная вязкость, $\frac{\text{МДж}}{\text{м}}$
			Удлинение, %	Сужение, %	
		Не менее			
ВТ20Л	880–1100	780	5	12	0,27

ВТ20Л, как и все псевдо- α -сплавы, отжигают для стабилизации структуры и снятия остаточных напряжений при температуре 750 °С в течение 1–2 ч. Температура солидуса сплава $T_{\text{солид}}=1560$ °С, а интервал кристаллизации 60 °С.

1.1.2. Структура титановых сплавов

На рисунке 2 показаны типичные микроструктуры титановых сплавов. В полуфабрикатах и деталях из титановых сплавов различают следующие типы микроструктуры: а – глобулярная, б – пластинчатая, в – корзиночного плетения, г – бимодальная [13].

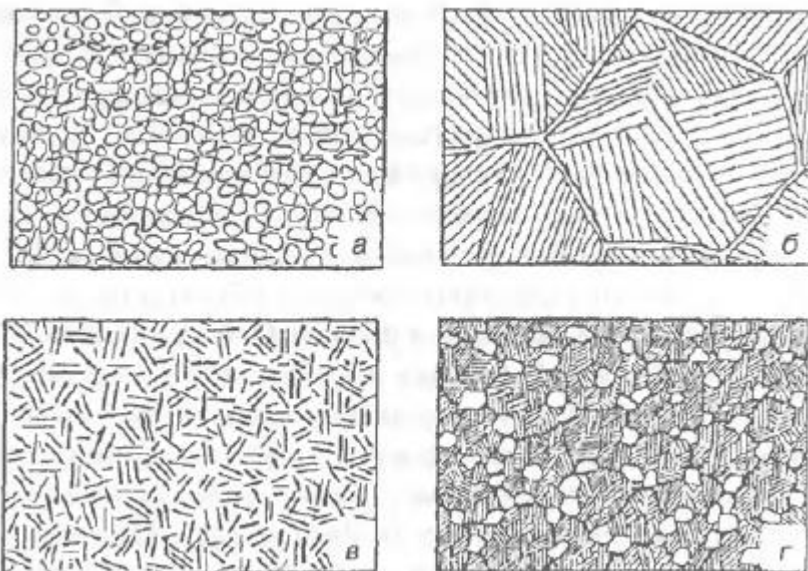


Рисунок 2 – Типичные микроструктуры титановых сплавов

Наиболее легко можно получить пластинчатую структуру. Такую структуру имеют фасонные отливки, полуфабрикаты, деформированные при температурах β -области, отоженные в β -области. С увеличением скорости охлаждения с температур β -области α -оторочки (если они есть) становятся тоньше, а все элементы пластинчатой структуры измельчаются. В зависимости от скорости охлаждения толщина α -пластин может изменяться от 5–10 мкм до долей микрометра, а размеры α -колоний от нескольких сотен микрометров до 3–5 мкм. При резком охлаждении с β -области в α -, псевдо- α - и $(\alpha+\beta)$ -сплавах формируется мартенсит (α' , α'' или ω) тонкопластинчатого строения, а в псевдо- β -сплавах фиксируется β -структура, иногда с ω -состоянием внутри нее [14].

1.1.3. Способы литья крупногабаритных тонкостенных титановых отливок

Деталь «Корпус разделительный» нового авиационного двигателя ПД–14 (рисунок 1) имеет габариты 2065x370 мм и минимальную толщину стенки 2,5 мм. Такая тонкостенная конструкция создана для снижения массы

двигателя, что приводит к экономии топлива. Эта конструкция состоит из нескольких деталей, получаемых литьем, они представлены на рисунке 3

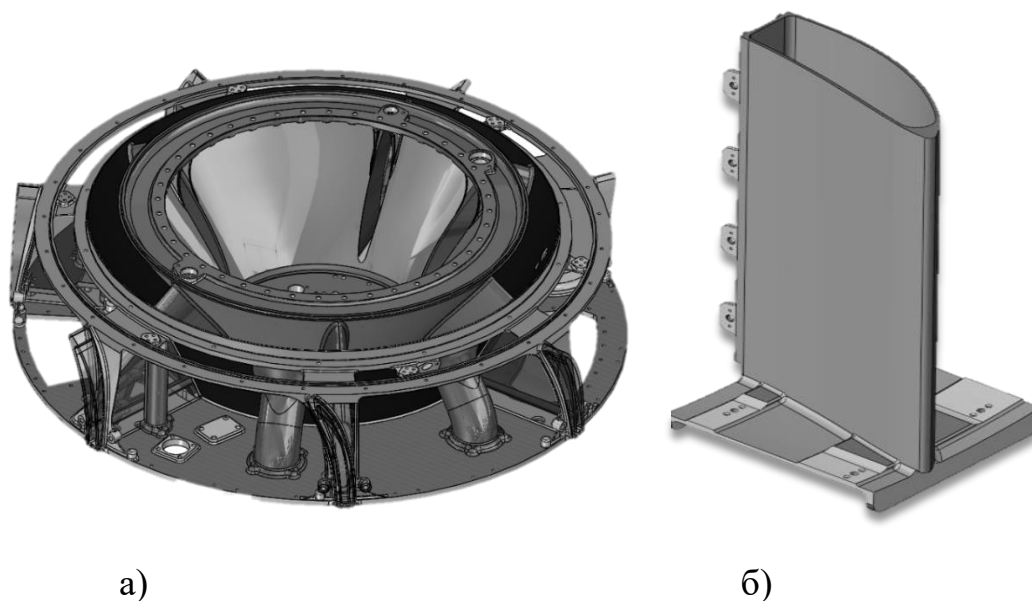


Рисунок 3– Отливки из сплава ВТ20Л а) «Втулка», б) «Стойка»

Деталь " Втулка" обладает диаметром 1160 мм и высотой 370 мм, а размеры детали "Стойка" - 420х245х200 мм. Известно, что такие литые детали из титановых сплавов в настоящее время изготавливаются литьём по выплавляемым моделям. В качестве материалов для них используют керамику различных оксидов или графит.

Ряд исследований [15,16,17] посвящён разработке технологии получения крупногабаритных отливок по выплавляемым моделям, однако получение тонкостенной отливки с высокой размерной точностью является сложной задачей. Это связано со многими факторами: низкими прочностными свойствами моделей и формовочной смеси, также возникает сложность при расчете усадки модели и керамического покрытия, климатических факторов и др. Для получения необходимой толщины стенки (до 3 мм) требуется стравливать до 10 мм толщины стенки отливки. Процесс травления – трудно

контролируемый и химически вредный, он также снижает эксплуатационные свойства изделия и заметно повышает его стоимость. Метод получения отливок по выплавляемым моделям в мировой практике останавливается на габаритных размерах 600 мм [18]. Также при изготовлении сложных по геометрии отливок возможно образование горячих трещин по причине плохой податливости формы. Для изготовления отливок используют литейные формы, полученные уплотнением, они, как правило, имеют неодинаковую плотность. Графитовые набивные формы, имеющие градиент плотности по объёму, предрасположены к непостоянной и неравномерной усадке в период их тепловой обработки, короблению и образованию трещин. Кроме того, эти способы литья требуют применения сложного комплекса оборудования и длительной подготовки производства для каждого конкретного изделия.

Метод литья по безмодельной технологии должен упростить задачу получения крупногабаритных тонкостенных отливок. В качестве материала для литейных форм можно использовать прессованные в блоки графитовые порошки различных марок. Их обрабатывают на многокоординатных станках с ЧПУ для получения элементов формы, которые затем собираются воедино. После заливки и остывания металла отливку из литейной формы извлекают путем разборки литейной формы, разрушая при этом невыемные части формы. Такой подход даёт возможность получать отливки практически любой конфигурации. В связи с развитием технологий появляется большое количество сложных отливок, следовательно, метод приобретает все большую актуальность.

К недостаткам способа литья можно отнести высокую стоимость графита, разрушение формы при удалении отливки, затрудненное удаление графитовой стружки из рабочей камеры станка при изготовлении элементов формы [19].

Так как метод литья по безмодельной технологии обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными способами литья, к тому же он требует меньше материальных и трудовых затрат, было решено изготовить

этим способом опытные крупногабаритные тонкостенные отливки для дальнейшего исследования.

1.1.4. Графит: марки, физико–механические свойства

Литейные формы для опытных крупногабаритных тонкостенных отливок из сплава ВТ20Л будут изготавливаться из графитовых блоков. Прессованный графит как материал для литейных форм, кристаллизаторов, инструмента и др. давно используется литейщиками. Различные марки графита подразумевают не только разнообразие химического состава, но и технологий изготовления. Их получают различными методами прессования: изостатическим (гидростатическим и газостатическим), горячим изостатическим и экструзией.

В результате полученные этими методами графитовые блоки обладают следующими свойствами:

- Термостойкость. Графит не плавится, а сублимирует при температуре ~ 3900 К и выдерживает резкие перепады температур.
- Теплопроводность у графита выше, чем у многих металлов, и уменьшается по мере повышения температуры. Теплопроводность графита зависит от конечной температуры обработки.
- Тепловое расширение. На величину коэффициента термического расширения графита в большой степени влияет его структура. Поэтому данный показатель специфичен для каждой марки графита и зависит от анизотропии материала и температуры.
- Смачиваемость. Графит не смачивается большинством расплавленных металлов, в том числе и титаном.
- Окисляемость. В присутствии избытка воздуха графит начинает окисляться с заметной скоростью при 750 К. Температура начала окисления может несколько отличаться для различных марок графитов в зависимости от природы исходного сырья, содержания минеральных примесей и температуры

термической обработки. Графит не растворяется в растворителях органического и неорганического происхождения, не взаимодействует со многими кислотами, растворами щелочей и солей.

– Механическая прочность. Прочность графита при растяжении, сжатии и изгибе повышается при повышении температуры до 2700 °С, и только после этого начинает снижаться. Этим графит резко отличается от других материалов; его прочность при 2700 °С примерно в 2 раза выше, чем при комнатной температуре.

– Анизотропия физических свойств. Физические свойства графита зависят от ориентации зерен кокса, из которых составляется рецепт. В свою очередь, на физические свойства графита влияет способ прессования. Графиту, прессование которого осуществляется методом экструзии, присуща четко выраженная анизотропия свойств. Зерна ориентированы перпендикулярно направлению прессования. Графиты, изготовленные методом штамповки и изостатического прессования, более изотропны, чем полученные методом экструзии. Из графита готовятся тигли, лодочки для производства сверхтвердых сплавов.

– Обработываемость. Графит хорошо поддается механической обработке; его свойства и структура позволяют изготавливать изделия сложных форм, с малыми допусками и с высокой точностью. Сочетание такого количества положительных свойств в одном материале предопределило его исключительно широкое применение [20].

Благодаря этим свойствам графитовые блоки подходят для использования их в качестве материала формы для крупногабаритных титановых отливок, однако стоит обратить внимание на величину зольности и пористости в них. Все графитовые блоки обладают развитой пористостью, в результате которой на поверхности формы адсорбируется значительное количество газов. При охлаждении и затвердевании металла нагревается форма, и происходит выделение этих газов. Они вступают в физико–химическое взаимодействие отливки с формой. Пores на поверхности графита

- это результат процесса изготовления этого материала. При изготовлении блока используют связующее, которое при обжиге выгорает и образует поры. Сгоревшее связующее образует золу. Её количество отражает содержание примесей в материале. Специальные технологии очистки графита позволяют снижать содержание золы до 10^{-4} – 10^{-5} % массы при содержании золы до 0,5% в исходных материалах. Также размер пор зависит от размера зерен графита, из которого изготовлен блок.

При литье поверхностные слои формы разогреваются до высоких температур (1200–1600 °С), за счет охлаждения отливки. В результате происходит термодиструкция кокса, которая сопровождается значительным выделением газов.

Взаимодействие золы, графита и выделяющихся газов с отливкой приводит к тому, что в сплаве повышается содержание вредных примесей (кислорода, азота, водорода, углерода и др.), особенно в поверхностном слое. В результате этого заметно ухудшаются эксплуатационные характеристики литых деталей. Поэтому целесообразно использовать в качестве материала формы высокочистые графиты. В таблицах 3 и 4 приведена спецификация марок и свойств высокочистых графитов по ТУ 1915–086–00200851–2007.

Таблица 3 – Спецификация марок и свойств графита по ТУ 1915–086–00200851–2007.

Свойства	Марка графита				
	ГМЗ	ЗОПГ	ППГ	ППГ–0	СГМ
Плотность, кг/м ³ , не менее	1600	1760	1700	1700	1560
Пористость, %, макс.	25	24	24	24	30
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	29,4	36,2	35,0	35,0	22,5
Предел прочности при изгибе, МПа, не менее	11,8	16,7	16,7	16,7	10,8
Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	5,5	10,0	8,9	8,9	5,6
Модуль упругости, Н/м ²	5300	8900	6800	6800	
КТР, 10 ^{–6} 1/ К	4,45	3,70	4,50	4,50	4,45
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	120	190	140	140	
Содержание золы, %	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02

Таблица 4– Содержание элементов в графите.

Наименование	Высокочистые графиты класса ОСЧ–7–3, %					
	ГМЗ	МГ	МГ–1	ЗОПГ	ППГ	УГЛИ
Кремний	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Железо	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Алюминий	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Магний	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Бор	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Медь	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Марганец	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$

Графиты марок ГМЗ, ППГ, ЗОПГ, МГ, МГ–1 классов чистоты ОСЧ–7–2, ОСЧ–7–3 [21] нашли широкое применение для изготовления различных конструкционных элементов, технологического оборудования в полупроводниковой и электронной технике. Также они применяются для изготовления труб, экранов, подставок для экранов, тиглей, нагревателей. Нагреватели используют взамен вольфрамовых и молибденовых для плавки редких и полупроводниковых металлов в вакуумных и других закрытых электропечах при температуре до 2000 °С. Из графитов указанных марок изготавливают защитные блоки и чехлы для термопар и термометров, работающих в нейтральных средах до 2300 °С и окислительной среде до 400–450 °С, плитки и блоки для футеровки химической аппаратуры, чугуновых и шлаковых желобов. Структура этих графитов может быть крупнозернистой (марки ГМЗ, ППГ, ЗОПГ) и мелкозернистой (марки МГ, МГ–1)[19].

Наиболее часто для изготовления оболочковых форм для литья титановых отливок используют графиты марок ГМЗ и ГЭ. Графит ГМЗ

относятся к классу малозольных среднезернистых графитов общего назначения, его свойства представлены в таблице 3.

ГЭ – графит электродный, изготавливается на основе нефтяного кокса и каменноугольного пека. По физико–механическим свойствам подобен материалу графитированных электродов и предназначен для изготовления фасонных изделий, его свойства представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики графита марки ГЭ по ТУ 48–20–86–81.

Физико–механические характеристики	ГЭ
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	23
Предел прочности при изгибе, МПа	5,9
Зольность, %	0,03
Удельное электросопротивление, мкОм·м	8–11
Плотность, г/см ³	1550

Согласно Государственному санитарно–эпидемиологическому нормированию Российской Федерации, графитовая пыль относится к пункту №2059 «в) другие ископаемые угли и углепородные пыли с содержанием свободного диоксида кремния до 5 %». Такие аэрозоли относятся к 4–му классу опасности (ГН 2.2.5.1313–03). Это малоопасные химические вещества, они представляют собой наименьшую угрозу из-за своих невысоких показателей опасности и токсичности. Предельно допустимая концентрация на рабочем месте (ПДК) составляет до 10 мг/м³.

Однако в результате применения современных технологий заготовки имеют малое количество примесей (содержание золы – 0,03% у графита ГМЗ по ТУ 1915–086–00200851–2007), в отличие от природного графита, у которого присутствует зола в большом количестве (10–20%). Она состоит из

различных составляющих, в том числе диоксида кремния, который вызывает болезнь – силикоз. В результате можно сделать вывод о том, что обработка графитовых блоков на специальных станках с ЧПУ, при соблюдении гигиенических норм и использовании индивидуальных средств защиты, ведет к сохранению экологии на производстве.

В качестве материала для литейных форм в этой работе было решено использовать графиты марок ГМЗ и ГЭ, так как они характеризуются низкой зольностью, достаточной прочностью и доступностью, за счет того, что эти материалы производятся на территории Российской Федерации.

1.1.5. Клей для соединения и ремонта графитовых форм

В связи с разработкой метода литья по безмодельной технологии возникает необходимость в разработке способов соединения графитовых элементов формы между собой, а также способов ремонта форм.

Одним из способов соединения графитовых элементов формы может быть склеивание. ФГУП ВИАМ разработано немало термостойких клеев горячего и холодного отверждения на основе элементоорганических, фенольных и карборансодержащих олигомеров с рабочими температурами 400–600 °С и с пределом прочности на сдвиг до 5 МПа при этих температурах [22–24].

В настоящей работе было предложено использовать в качестве компонента клея пульвербакелит – смесь новолачной фенолформальдегидной смолы с уротропином. Наличие бензольных ядер в фенолформальдегидных смолах обеспечивает стойкость к термодеструкции, а наличие гидроксильных групп - высокую адгезию к различным материалам [25]. Полимеризация новолачной смолы в присутствии уротропина происходит при температурах 150–180 °С [26, 27]. Термодеструкция фенолформальдегидных смол идет в несколько этапов [28]. На первом этапе в интервале температур 25–250 °С происходит выделение влаги и легко летучих соединений (ацетон, пропилен,

пропанол и бутанол), потеря массы при этом составляет 50–59 %. На втором этапе в интервале температур 230–400 °С потеря массы не значительна, начинаются процессы карбонизации, выделения CO₂, фенола и формирования пористой структуры. На следующем этапе (400–900 °С) наблюдается разрыв связей и образование летучих компонентов, таких как CH₄, CO, H₂, C₂H₆, CO₂ и др. [29– 31].

При прокаливании бакелита выше 350 °С идет выделение летучих веществ, и образуется твердый остаток CaCO₃, SiO₂, CaO, C и др. [32]

Известно, что повысить термостойкость фенолформальдегидных смол можно добавками бора, кремния, углеродных материалов [25, 30, 33, 34, 35], а повысить пластичность (при значительном снижении термостойкости) - с помощью синтетического каучука, поливинилацеталей, полиамидов [25, 36]. Было принято решение использовать немодифицированную смолу (пудербакелит), так как в результате термодеструкции модифицированных смол состав продуктов реакции усложняется, и продуктами разложения смолы будут различные соединения с кислородом и кремнием, что нежелательно, так как титановые сплавы достаточно активны.

При склеивании изделий, работающих при повышенных температурах, большое значение имеет соотношение коэффициентов термического расширения склеиваемого материала и клея. Понизить эту разницу можно введением в клей в качестве наполнителя диспергированных частиц склеиваемого материала [36]. В случае склеивания графитовых элементов в качестве наполнителя для клея можно использовать графит, так как при механической обработке графитовых блоков получается большое количество графитового порошка различных фракций.

1.2 Моделирование процессов литья и затвердевания отливок в СКМ ЛП «Procast»

Для снижения затрат на разработку технологии и сроков запуска в производство отливок используют моделирование процессов литья. Особенно это актуально для сложных по геометрии отливок. Зарубежные программные продукты являются лидерами на рынке в этой области. Однако базы данных теплофизических свойств и граничных условий в этих программах недостаточны и даны в основном для импортных материалов. Для получения адекватных результатов моделирования целесообразно использовать наиболее достоверные данные, особенно для сложных по конфигурации отливок. Теплофизические свойства сплавов с достаточной для моделирования точностью можно рассчитать с использованием термодинамических баз, встроенных в системы компьютерного моделирования. Однако при этом нужно знать граничные условия, наиболее важным из которых является коэффициент теплопередачи между отливкой и формой (h) [37]. Он показывает, какое количество теплоты передается от горячего теплоносителя к холодному за 1 с через 1 м² стенки при разности температур между теплоносителями, равной 1 °С [38].

Значения коэффициента теплопередачи колеблются в широком диапазоне в зависимости от условий, в которых происходит теплопередача. Например, для одних и тех же сплавов коэффициент теплопередачи при литье прокаткой [39] и литье под давлением [40] выше, так как в таких процессах наблюдается более тесный контакт с формой. Также влияет шероховатость поверхности формы, атмосфера в зазоре отливка – форма [41] и величина зазора между поверхностями отливки и формы, который появляется и изменяется при усадке сплава отливки и тепловом расширении материала формы [42].

В редких случаях удастся достаточно точно определить коэффициент теплоотдачи теоретически. Как правило, он определяется экспериментально.

Наиболее популярный метод основан на определении температуры разогрева формы и температуры сплава отливки в момент заливки, кристаллизации и охлаждения [43]. Затем создают математическую модель этого процесса, подбирая значения коэффициента теплопередачи, такие, чтобы разница между экспериментальными результатами и расчетными значениями температур была минимальной. Эту разницу характеризует функция ошибок Err .

В общем виде эта функция описывается уравнением (1) [44, 45]:

$$Err = \sum_{i=1}^n (t_p^i - t_3^i)^2, \quad (1)$$

где t_p и t_3 – расчётная и экспериментально определённая температура в форме и отливке, °С;

n – количество измерений.

При температуре выше ликвидуса коэффициент теплопередачи может значительно отличаться от значений h при температурах ниже солидуса. Поэтому для повышения адекватности моделирования значение коэффициента теплопередачи представляют не одним значением, а как зависимость от времени [46, 47] или температуры [48, 49].

1.3 Жидкотекучесть сплава ВТ20Л в графитовой форме

Заполняемость как литейное технологическое свойство зависит от жидкотекучести сплава, теплофизических свойств и начальной температуры литейной формы, геометрических параметров отливки, скорости течения металла по каналам и полостям формы в период ее заполнения [50]. При заполнении формы происходит интенсивное снижение температуры сплава и, следовательно, вязкости. Это может привести к образованию дефектов: недоливов и неспаев. Для крупногабаритных тонкостенных отливок это свойство играет важную роль.

Жидкотекучесть характеризует способность сплава заполнять форму, которая определяется по прекращению течения в каналах специальных проб различной формы и сечения. Она зависит не только от свойств самого сплава, но и от материала литейной формы и качества её поверхности.

Литейные титановые сплавы в соответствии с двойной диаграммой состояния Ti–Al, на основе которой они разработаны, имеют небольшой интервал кристаллизации – 50–80 °С [51]. Дополнительное легирование V, Zr не оказывает значительного влияния на эту величину. Более широкий интервал кристаллизации (рисунок 4) наблюдается при введении Si, Mo, Nb, W, Cr, Fe. Но поскольку эти компоненты входят в промышленные сплавы преимущественно в небольших количествах (0,2–3,0 %), их отрицательное влияние на литейные свойства невелико.

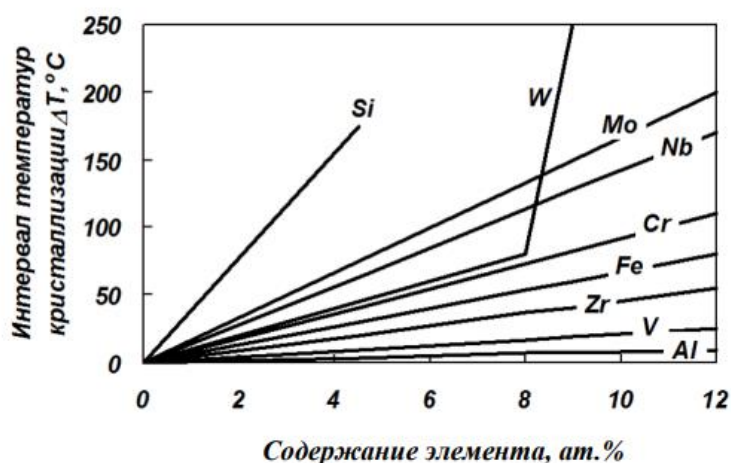


Рисунок 4 – Температурные интервалы кристаллизации двойных сплавов титана

На рисунке 5 представлено изменение жидкотекучести двойных сплавов титана с десятью основными легирующими элементами. Добавление алюминия увеличивает жидкотекучесть титана, улучшает его литейные и механические характеристики, поэтому в сплаве BT20Л он является основным легирующим компонентом.

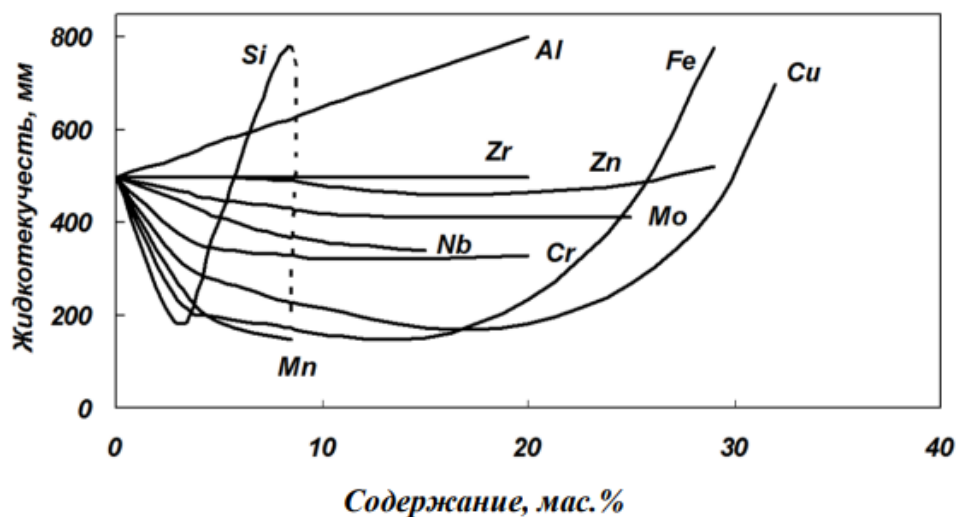


Рисунок 5 – Влияние легирующих элементов на жидкотекучесть титана

В статье [52] было изучено изменение жидкотекучести титанового сплава BT20Л в зависимости от количества примесей газов. Определение жидкотекучести проводили на спиральной пробе треугольного сечения высотой 15 мм, шириной 10 мм, с площадью поперечного сечения 75 мм. В верхней части пробы находится специальный металлоприемник, в который заливали всю порцию сливаемого металла. Форма изготовлена из прочного графита марки РВ. После заливки форму разбирали и измеряли длину залитой спирали. В результате определили, что жидкотекучесть сплава BT20Л при получении слитков, независимо от количества примесей, имеет близкие значения. Жидкотекучесть находится на уровне ~ 430 мм, т.е. достаточно высокая.

Авторы книги [53] изучали жидкотекучесть титановых сплавов BT1Л, BT5Л, BT9Л, BT21Л. Заливку производили в спиральную графитовую форму из наиболее прочного графита марки РВ. Они пришли к выводу, что сплав BT5Л обладает наиболее высокой жидкотекучестью.

Затем они сравнивали жидкотекучесть сплавов в формах, изготовленных из различных материалов. Заливка производилась в пробы с цилиндрическими каналами различных сечений с диаметрами от 2,5 мм до 15 мм. Наилучшие

результаты авторы получили при заливке в корундовые формы, а наихудшие - в графитовые. Авторы производили заливку при температуре 1800 °С, используя общий металлоприемник, через который металл распределялся по пробам из различных материалов. Для сплава ВТ20Л измерения жидкотекучести не производились. Однако следует отметить, что при проектировании технологии литья крупногабаритных тонкостенных отливок жидкотекучесть сплава в форме играет важную роль.

Для определения жидкотекучести в основном выделяют два типа проб: сужающиеся и постоянного сечения. К пробам, имеющим сужающиеся каналы, относятся клиновая и шариковая пробы. Особенностью проб, имеющих сужающийся канал, является то, что прекращение течения происходит как вследствие кристаллизации, так и под действием сил поверхностного натяжения. Это позволяет оценивать не только жидкотекучесть, но и формозаполняемость, что важно для сплавов, используемых при изготовлении художественных отливок. Однако, в связи с низкой сходимостью результатов, эти пробы не нашли широкого применения [54].

Другой вид проб основан на прекращении течения расплава в длинном канале постоянного сечения. К ним относятся прутковая, спиральная, U-образная, лабиринтная, винтовая и пробы с несколькими каналами разной толщины (звездообразная, «арфа»). Наиболее распространенные из них - спиральная и U-образная.

В условиях вакуумной плавки титановых сплавов применение спиральной пробы вызывает технические трудности. Они связаны с использованием стопора, который обеспечивает стабилизацию напора подаваемого расплава. Его необходимо подрывать в момент полного заполнения чаши расплавом, для этого необходимо разместить механизм, который будет это осуществлять и обеспечить визуальный контроль над зеркалом расплава в чаше.

U-образная проба значительно упрощает задачу, так как ее конструкция обеспечивает стабилизацию напора расплава, к тому же она в основном применяется для сплавов, обладающих относительно низкой жидкотекучестью. В данной работе для определения жидкотекучести сплава BT20Л было решено применять U-образную пробу.

1.4 Шероховатость поверхности титановых отливок и литейных форм

Углеродные материалы обладают более высокой химической стойкостью по отношению к титану, к тому же они обладают высоким качеством поверхности после обработки фрезерованием [55].

При литье в графитовые формы основным элементом, вызывающим изменение поверхностной микротвердости отливок, является углерод, диффундирующий на значительную глубину. Влияние кислорода, десорбирующего с поверхности зерен графита, на этот параметр по сравнению с углеродом менее значительно [56].

В статье «Исследование поверхностных газонасыщенных слоев отливок из титанового сплава BT5Л при литье в различные формы» [56] описана взаимосвязь качества материала литейной формы с качеством поверхностного слоя отливки. Литейные формы изготавливались из материала на основе графита методом уплотнения с последующим спеканием. Сведений о применении в качестве материала литейной формы прессованных графитовых блоков в этой статье не приводится.

Прессованные графитовые блоки, в отличие от уплотняемых форм, обладают более высокой плотностью (больше примерно на 600 кг/м^3) и прочностью, более низкой пористостью и зольностью до 0,1%. Это позволяет предположить, что их применение в качестве материала литейной формы даст возможность получать титановые отливки с повышенным качеством их поверхностного слоя. Данное предположение обусловлено тем, что во время контакта с жидким металлом поверхность формы, во-первых, интенсивно

разогревается, а во–вторых, подвергается эрозионному воздействию со стороны потока расплава. Вследствие этого даже на ровной, гладкой поверхности выступающие на ней неровности, образующиеся от режущего инструмента, будут предрасположены к активному взаимодействию, как химически, так и механически, с жидким металлом [57].

1.5 Альфированный слой

Альфированный (газонасыщенный) слой обладает повышенной твердостью и является причиной снижения эксплуатационных характеристик деталей из титановых сплавов. В работе [56] исследовали взаимосвязь качества материала литейной формы с качеством поверхностного слоя отливки. Для сравнения использовали корундовые формы с порошком алюминия и 1,5 % мас. SiO_2 , корундовые с 6 % мас. и 8 % мас. SiO_2 и уплотняемые графитовые литейные формы, полученные спеканием. На поверхности отливки, полученной в графитовые формы, наблюдалась наименьшая толщина альфированного слоя. Классические методы литья отливок, в том числе с использованием современных составов керамических оболочек, позволяют получить альфированный слой в отливках от 2 мм до 8 мкм [56–67]. Альфированный слой образуется не только при взаимодействии расплава с газами, адсорбированными на поверхности формы и выделяющимися в процессе нагрева из связующих, содержащихся в материале формы, но и в результате взаимодействия с самим материалом формы [68]. Термохимическая инертность форм – одно из основных условий получения качественных отливок из титановых сплавов [69]. В методе литья по безмодельной технологии используются прессованные графитовые блоки, они обладают более высокой плотностью (более 1500 кг/м^3), в отличие от уплотняемых пневматическими или ручными трамбовками (до 1200 кг/м^3). В них содержится малое количество связующих по сравнению с другими материалами форм, к тому же углеродные материалы наиболее инертны к

титановым сплавам. А высокая теплопроводность материала приводит к снижению времени взаимодействия расплава с формой благодаря быстрому затвердеванию [70].

При производстве тонкостенных (менее 5 мм) отливок необходимо использовать центробежное литье. Прочность форм, выточенных из графитовых блоков, позволяет использовать высокие скорости вращения при центробежной заливке металла в литейные формы. При этом роль скорости вращения в формировании структуры намного больше, чем величина перегрева расплава и материала формы. Увеличение числа оборотов центробежного стола способствует уменьшению пористости в отливке [71], объёмной доли неметаллических включений [72], что приводит к формированию однородных структуры и химического состава.

Можно предположить, что поверхность отливки, полученная перспективным методом литья, будет менее загрязненной по сравнению с другими способами. Это подтверждается исследованиями альфированного слоя, которые проводили с использованием форм из механически обработанного графита. Так, в статье [73] авторы произвели измерение микротвердости поверхностного слоя титановых образцов, залитых в формы из различных материалов, для определения толщины альфированного слоя. Заливка производилась в стационарные формы, изготовленные из оксидов ZrO_2 , Al_2O_3 , CaO , $CaZrO_3$ и графита. Результаты показали, что минимальное взаимодействие происходит при использовании керамики на основе CaO , $CaZrO_3$ и графита. Еще в одной работе [74] авторы получили альфированный слой до 150 мкм при литье в графитовую форму гамма-алюминид титана $\gamma-TiAl$. Образование слоя они объяснили результатом загрязнения поверхности углеродом, поскольку он легко образует твердые растворы внедрения с титаном.

На взаимодействие расплава с литейной формой также влияет качество её поверхности. Высокая шероховатость увеличивает площадь контакта, адсорбцию газов и способствует размыванию формы потоком расплава, что

ведет к увеличению неровностей и загрязнению поверхностного слоя и тела отливки. Поэтому качество отливки, особенно поверхностного слоя, напрямую зависит от шероховатости формы. Известно, например, что, в зависимости от состояния поверхности, предел выносливости сплава может изменяться более чем в 2 раза [51]. Наименьшую шероховатость поверхности отливки авторы статьи [74] получили литьем в графитовые формы, в сравнении с многослойными керамическими оболочками. При использовании ZrO_2 во многих местах на поверхности отливки образовался пригар, который усложнял процесс измерения шероховатости, но на участках где его не было, шероховатость поверхности отливки была ниже, чем при использовании графитовых форм.

Значения шероховатости поверхностей отливки, относительно количества металла, пройденного через сечение, должны отражать интенсивность взаимодействия металла с формой, поэтому необходимо измерить на этих же участках глубину альфированного слоя и определить эту зависимость. А также, поскольку метод литья крупногабаритных тонкостенных отливок недостаточно распространен, необходимо проанализировать влияние материала формы на свойства отливки.

1.6 Точность отливки, получаемой по безмодельной технологии

Метод изготовления литейной формы из графитовых блоков отсутствует в ГОСТ Р 53464—2009 «Отливки из металлов и сплавов». При разработке технологии литья необходимо знать, что выбранный метод литья позволит обеспечить размерную точность отливки в соответствии с ее классом. В литературе отсутствуют сведения о размерной точности, которая достигается при использовании метода литья по безмодельной технологии при изготовлении отливок из титановых сплавов в графитовые формы.

Размеры отливок контролируют с помощью контактных и бесконтактных методов измерения [75]. К контактным относятся методы,

использующие координатно–измерительные системы [76]. Координатно–измерительные системы позволяют автоматизировать процесс измерения [77], поэтому достаточно часто их используют в крупносерийном производстве.

К бесконтактным методам относятся компьютерная томография и оптические методы измерения. Компьютерная томография позволяет изучить внутреннюю структуру отливки, включая форму полостей, отверстий и дефектов (усадочные пустоты, поры и трещины) [78– 79].

К оптическим методам относятся фотограмметрия [80], сканирование с использованием структурированного белого света [81—83] и лазерное сканирование [84, 85].

1.7 Постановка научной задачи и частные задачи исследования

В результате проведенного литературного анализа проблемы были сформулированы частные задачи для ее решения:

1. Для исследований необходимо изготовить опытные отливки из сплава ВТ20Л.

2. Несмотря на то, что графит как материал для литейных форм, кристаллизаторов, инструмента и др. используется литейщиками достаточно давно, тем не менее необходимо провести дополнительные исследования этого материала применительно к безмодельной технологии изготовления крупногабаритных титановых отливок.

3. Установлено, что для получения адекватных результатов моделирования процессов заполнения и затвердевания отливок из сплава ВТ20Л в литейных формах, изготовленных путем фрезерования из графитового блока марки ГМЗ, обязательно требуется определить значение коэффициента теплопередачи между литейной формой и отливкой.

4. Предположено, что значения шероховатости поверхностей отливки относительно количества металла, пройденного через сечение полости литейной формы, должны отражать интенсивность взаимодействия расплава с

формой. Необходимо сопоставить значения глубины альфированного слоя и шероховатости поверхности отливки для определения этой зависимости.

5. Информация в литературе о литье крупногабаритных тонкостенных отливок из титановых сплавов достаточно скупая и не достаточная для организации производства конкретных отливок, в связи с этим необходимо проанализировать влияние графитового материала литейной формы на свойства сплава BT20Л в отливке и рассчитать величину его усадки.

2. Методики проведения экспериментов

2.1 Методика определения коэффициента теплопередачи между формой из графита ГМЗ и отливкой из сплава ВТ20Л

В процессе изучения метода литья по безмодельной технологии было решено изготовить опытные отливки, но сначала необходимо разработать технологию их изготовления. В настоящее время для этого используют математическое моделирование процесса литья, чтобы избежать дополнительных затрат на производственные эксперименты.

2.1.1. Методика изготовления графитовой формы

Для проведения моделирования процесса литья титановых отливок необходимо определить граничное условие: коэффициент теплопередачи. Для этого был проведен эксперимент, который заключался в том, что в вакуумной плавильной печи получили цилиндрическую отливку в графитовую форму. В форме были размещены 8 термопар и одна в отливке, которые фиксировали и записывали значение температур в процессе литья.

Графитовую форму изготавливали из графита марки ГМЗ путем фрезерования графитовых блоков. Она состояла из 4 частей. Схема расположения термопар в ней представлена на рисунке 6. Термопары размещали по высоте на двух уровнях: нижний уровень – термопары T_1 , T_2 , T_3 , T_4 (между частями формы I и II); верхний уровень – термопары T_6 , T_7 , T_8 , T_9 (между частями формы II и III). Расстояние между нижним и верхним уровнями по вертикали составляло 40 мм. От рабочей поверхности формы до термопар расстояние составляло: T_1 и T_6 – 2 мм; T_2 и T_7 – 5 мм; T_3 и T_8 – 10 мм; T_4 и T_9 – 20 мм. Термопара T_5 помещалась в керамическую трубку, и ее спай находился в полости формы на расстоянии 10 мм от её рабочей поверхности. Между III и IV частями формы была обеспечена теплоизоляция с помощью

каолиновой ваты, чтобы осуществлять теплопередачу только в радиальном направлении, без существенного влияния на нее верхней массивной части формы (заливочной воронки).

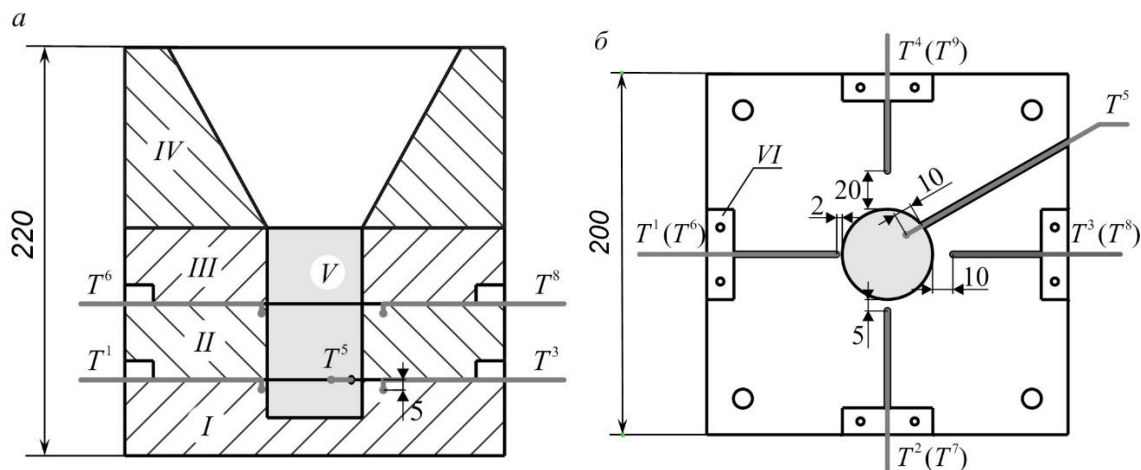


Рисунок 6 – Схема расположения термодпар в форме
 а – продольный разрез формы (I–IV – части формы, V – отливка);
 б – вид сверху на плоскость разъема формы (VI – элемент
 крепления термодпары)

Фиксация термодпар осуществлялась с помощью графитовых элементов VI, крепящихся к форме шурупами–саморезами.

2.1.2. Методика приготовления расплава ВТ20Л, получения отливки и записи температур формы и отливки.

Затем производили плавку и разливку в вакуумном индукционном плавильно–литейном комплексе ВИП–4–20 в лаборатории вакуумной плавки и литья кафедры литейных технологий и художественной обработки материалов НИТУ «МИСиС».

В эксперименте использовали плавильный тигель из графита ГМЗ (ТУ 48–4802–86–97), на дно которого загружалась навеска 2,5 кг готового сплава

BT20Л (ТУ 1–92–184–91). В печи создавался вакуум 1,3–0,13 Па, процесс плавки длился 90 минут. Контроль температуры в тигле осуществляется бесконтактным пирометром с пределом измерений до 3000 °С, который был направлен на зеркало расплава. Литъё в графитовую форму производилось поворотом плавильного узла с тиглем при 2000°С в течении 3 сек.

Запись показаний термопар, размещенных в форме и отливке, выполняли с помощью 12–канального термоизмерителя BTM–4208SD («Lutron», Израиль), он изображен на рисунке 7, с интервалом в 1 секунду в течение 1200 с.



Рисунок 7–12–канальный термоизмеритель BTM–4208SD

Затем отливка остывала до 300 °С, после чего производился напуск атмосферы для разгерметизации. После того как отливка остыла, форму извлекли и разобрали.

2.1.3. Методика определения химического состава сплава

Определение химического состава сплава экспериментальной отливки производили на оптико-эмиссионном спектрометре ARL 4460 OES фирмы «Thermo», его изображение представлено на рисунке 8.



Рисунок 8 – Оптико-эмиссионный спектрометр ARL 4460 OES

Эмиссионный спектральный анализ – чувствительный метод качественного и количественного элементного анализа, основанный на использовании спектров испускания свободных атомов и одноатомных ионов в газовой фазе [86]. Этот метод широко применяется в металлургии и других отраслях науки.

Из цилиндрических отливок вырезали образцы и изготовили шлифы. Анализ провели при следующих параметрах: рабочая среда – аргон, напряжение – 230 В.

2.1.4. Методика моделирования процесса заливки и затвердевания отливки в СКМ ЛП «ProCast»

Далее было проведено моделирование процесса заполнения и затвердевания этой цилиндрической отливки при различных значениях коэффициента теплопередачи в программе «ProCast 2016» («ESI Group», Франция). Это позволит нам получить зависимости температуры от времени для охлаждения отливки и нагрева формы и сравнить их с экспериментальными значениями. По окончании моделирования нужно будет отобрать те значения коэффициента теплопередачи, при которых функция ошибок (1) минимальна [87].

Сначала необходимо было рассчитать теплофизические свойства сплава BT20Л в зависимости от химического состава и сравнить результаты с литературными данными. Для этого в базе данных материалов, которая находится в разделе Visual – Cast в меню Cast – Volume Manager нужно выбрать теплофизическую базу данных по основному компоненту, в нашем случае это Ti–Al, и запустить процесс расчёта теплофизических параметров материала, таких как теплопроводность, энтальпия, плотность, доля твердой фазы.

Для графита ГМЗ необходимо сравнить данные из программы «ProCast 2016» с имеющимися данными из литературных источников и выбрать наиболее подходящие для моделирования данные.

Затем после выполнения всех подготовительных этапов (построения 3D сетки, задание вектора гравитации, способа литья и параметров теплопередачи между частями формы, отливкой и окружающей средой) указать параметры моделирования:

Время заполнения формы, с	3
Температура заливки расплава, °C	2000
Начальная температура формы, °C	20

Значение коэффициента теплопередачи задаем в виде зависимости от температуры. Вначале в процессе заливки, затвердевания и охлаждения происходит интенсивное охлаждение отливки. Температура снижается до 300 °С, и далее происходит медленное охлаждение. Поэтому коэффициент теплопередачи целесообразно определять до этой температуры. Для первого моделирования использовали значение h постоянным и равным 1000 Вт/(м²·К) для всех температур. После расчета были построены графики зависимости температуры от времени, прошедшего с момента заливки, в точках размещения термопар T_1 – T_9 . Их сравнили с экспериментально полученными результатами в этих же точках и рассчитали функцию ошибок в каждой секунде.

Для упрощения графика зависимости коэффициента теплопередачи от температуры поверхности отливки его разбили на линейные участки между точками 300 °С, 500 °С, 700 °С, 900 °С, 1100 °С, 1200 °С, 1250 °С, 1300 °С, 1350 °С, 1400 °С, 1450 °С, 1500 °С, 1550 °С, 1595 °С, 1600 °С, 1650 °С, 1665 °С, 1800 °С, 1900 °С, 2000 °С. Затем, меняя значения h с шагом 100 Вт/(м²·К) в этих точках, проводили моделирование процесса литья повторно, до тех пор, пока значение функции ошибок не оказалось самым минимальным. Далее шаг будет уменьшаться до 5 Вт/(м²·К) на участках, где будет наблюдаться наибольшее изменение величины коэффициента теплопередачи. Полученные данные будут использоваться дальше в работе, для моделирования опытных отливок.

2.2 Методика определения жидкотекучести сплава ВТ20Л

При разработке технологии изготовления опытных отливок необходимо оценить жидкотекучесть титанового сплава в форме.

Для определения жидкотекучести использовались две пробы U-образной формы одна из стали 20, другая из графита марки ГМЗ, эскиз представлен на рисунке 9.

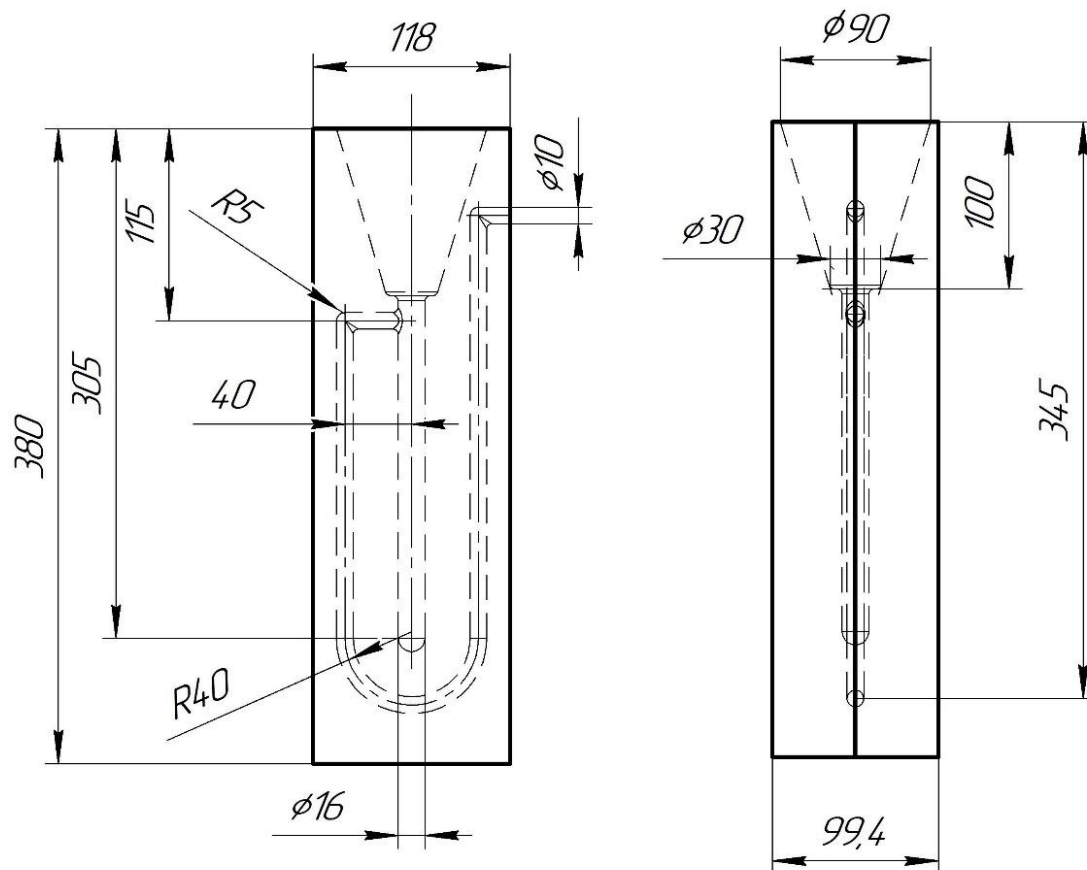


Рисунок 9 – Эскиз формы для определения жидкотекучести.

Плавку и разливку также производили в вакуумном индукционном плавно–литейном комплексе ВИП–4–20.

В эксперименте использовали плавильный тигель из графита ГМЗ (ТУ 48–4802–86–97), на дно которого загружалась навеска 1,7 кг готового сплава ВТ20Л (ТУ 1–92–184–91). В печи создавался вакуум 1,3–0,13 Па, процесс плавки длился 90 минут. Контроль температуры осуществлялся бесконтактным пирометром с пределом измерений до 3000 °С. Разливку в форму производили при 1800°С. Затем измеряли длину залитой пробы в различные формы и сравнивали их между собой.

2.3 Методика проведения эксперимента по разработке клеевых составов

В качестве склеиваемых материалов использовались малозольный графит марки ГМЗ и электродный графит марки ГЭ. Свойства этих графитов, указанные в технических условиях, представлены в таблицах 3 и 5 соответственно. Для приготовления клеев использовали порошок графита марки ГМЗ (фракция 200 мкм), пульвербакелит (СФ–015. ГОСТ 18694–80), бакелитовый лак (ЛБС–1 ГОСТ 901–78) и этиловый спирт.

Было приготовлено 4 клея. Составы клеев представлены в таблице 6. Клеи I, II и IV содержат в себе пульвербакелит, графит и спирт в различных соотношениях. При приготовлении сначала смешивали сыпучие компоненты – графитовый порошок и пульвербакелит, а потом добавляли спирт до получения клея необходимой вязкости, обеспечивающей отсутствие стекания слоя клея со склеиваемых поверхностей и достаточную кроющую способность для легкого нанесения. Вязкий клей не растекается по поверхности склеиваемых элементов, а значит, можно избежать излишних операций зачистки мест, не подлежащих склеиванию. Клей III готовили путём смешивания графитового порошка с бакелитовым лаком. Соотношение бакелитового лака и графитового порошка подбиралось таким, чтобы обеспечить ту же вязкость, что и у клеев I, II, IV.

Таблица 6 – Составы исследуемых клеев

Клей	Содержание компонента, % масс.			
	Графитовый порошок	Пульвербакелит	Бакелитовый лак	Спирт
I (Г42П32С26)	42	32		26
II (П80С20)		80		20
III (Г37Б63)	37		63	
IV (Г52П8С40)	52	8		40

На фрезерном станке из графитов марки ГМЗ и ГЭ были изготовлены образцы для испытаний на сдвиг. Схема склеивания образцов представлена на рисунке 10.

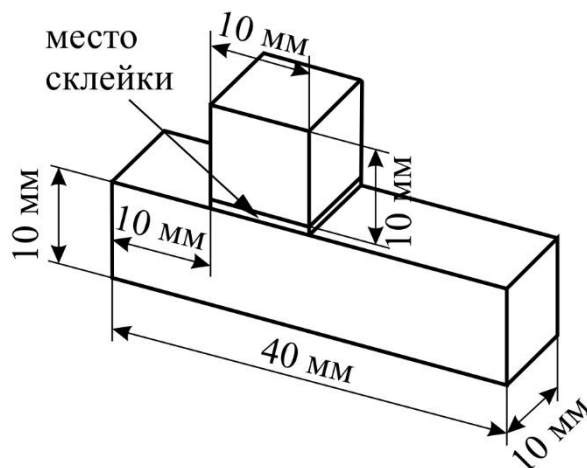


Рисунок 10 – Схема склеивания образцов для испытаний на сдвиг

На склеиваемые поверхности, указанные на схеме, наносили клей слоем $\sim 0,5$ мм и прижимали образцы друг к другу при помощи струбцин. При этом излишки клея выдавливались из зазора. Далее образцы помещали в термическую печь и нагревали до температуры склеивания. Нагрев образцов осуществляли по режимам, представленным на рисунке 11. Всего было 4 температуры нагрева: 200, 400, 600 и 800°C. По каждому режиму нагрева склеивали 5 образцов. Графики нагрева построены по результатам измерения температуры в печи с помощью термопары. Из графиков (рисунок 11) видно, что скорость нагрева составляла ~ 10 °C/мин. После того как в печи достигалась заданная температура, осуществлялась выдержка в течение 30 минут и печь выключали. Охлаждение происходило при открытой дверце печи.

Испытания на сдвиг проводились на универсальной испытательной машине INSTRON 5569.

Металлографический анализ изломов и микроструктуры клеевых швов проводился с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Tescan Vega SBH3 с приставкой энергодисперсионного микроанализа Oxford.

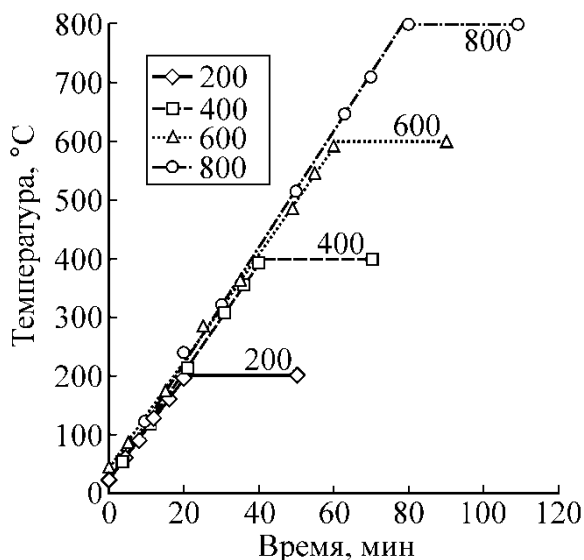


Рисунок 11 – Режимы нагрева образцов до температуры склеивания (200, 400, 600 и 800 °C)

2.4 Методика получения опытной отливки

При конструировании литниковой системы для опытных отливок «Втулка» и «Стойки» (рисунок 3) опирались на классические методики конструирования титановых отливок и литниковых систем, а также результаты моделирования, учитывая материальную оснащённость вакуумных дуговых установок «НИАТ 833 Д» (рисунок 12) и «ALD VAR 1500SM–Ti» (рисунок 13) на ПАО «ОДК-УМПО».

Печь «833Д» предназначена для мелкосерийного производства титановых отливок малых и средних габаритов. Данная установка оснащена медным водоохлаждаемым тиглем с емкостью по сливу 75 кг, максимальные размеры заливочного контейнера по диаметру 1000 мм, по высоте 700 мм. Частота вращения центробежного стола регулируется от 0 до 400 об/мин [88].

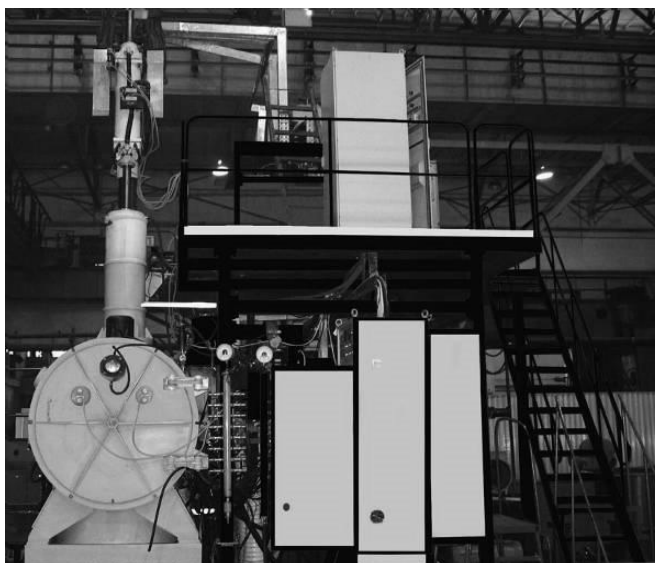


Рисунок 12 – Установка вакуумная электродуговая плавильная «833Д»

Основные технические характеристики установки «833Д» приведены ниже.

Емкость тигля, не менее: 120 кг

Разрежение в плавильной камере

холодной электропечи $1,33 \cdot 10^{-1}$ ($1 \cdot 10^{-3}$), Па (мм рт.ст)

Электрическая мощность дуги 650, кВт

Габариты рабочего пространства заливочного контейнера:

– Диаметр: 1000 мм

– Высота: 630 мм

Размеры используемого электрода:

– Диаметр 280 мм

– Высота 1000 мм

Дуговая вакуумная плавильная установка ALD VAR 1500SM–Ti, приобретенная ПАО «ОДК-УМПО», имеет сменные тигли емкостью по жидкому титану 150, 250 и 500 кг, при этом продолжительность поворота

тигля может регулироваться в пределах 6–30 с, обеспечивая скорость заливки (соответственно для указанных тиглей) в пределах примерно 5–25, 8–40 и 17–90 кг/с.

Для размещения формы установка оснащена контейнером диаметром 1750 и высотой 1000 мм (рисунок 13).

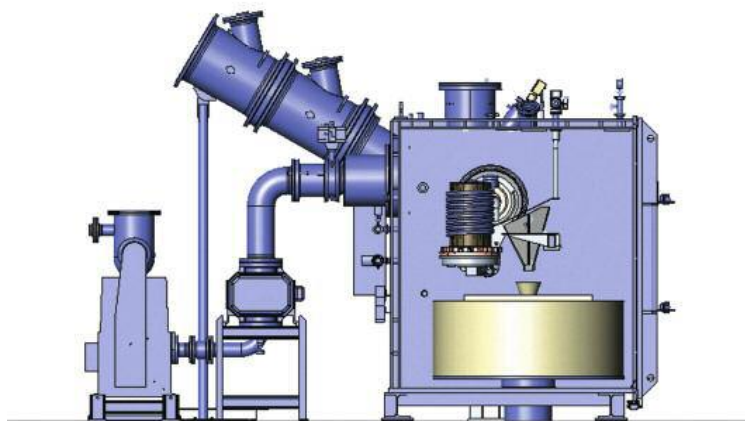


Рисунок 13 – Схема ALD VAR 1500SM–Ti с размещенным контейнером

Данная плавильная установка дооснащена центробежным столом, который может вращаться со скоростью до 100 об/мин.

Расплавленный металл сливается из тигля в лоток с наклонной стенкой в виде полукруглого желоба (рисунок 14).



Рисунок 15– Станок с ЧПУ фирмы SANOS «DYNAMIC»

2.5 Методика изучения шероховатости отливки и литейной формы для изготовления отливки

После изготовления элементов формы определяли параметры шероховатости их поверхностей, полученных при различных режимах резания и при применении различных инструментов.

Измерения шероховатости проводились контактным методом с помощью прибора MarSurf M 300C. Длина базовой линии составляла 5,6 мм. Схема проведения испытаний на определения шероховатости представлена на рисунке 16.

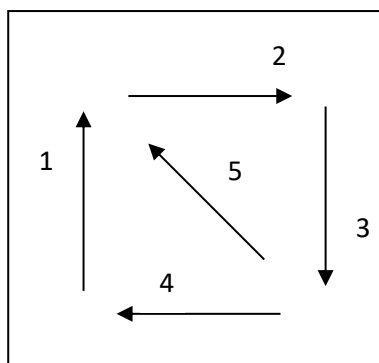


Рисунок 16 – Схема измерения шероховатости на поверхности, где 1,2,3,4,5 – направления измерения.

Взаимодействие расплава с поверхностью литейной формы будет зависеть от количества металла, пройденного через сечение отливки, и его температуры. В связи с этим провели измерение шероховатости поверхности элементов формы в местах с различным воздействием на них со стороны расплава в процессе литья. После заливки металла в форму произвели выбивку отливки из графитовой формы. Часть элементов была извлечена без разрушения. Для оценки взаимодействия металла с поверхностью графитовой формы произвели измерение шероховатости поверхности отливки и формы после контакта с металлом на тех же участках, через которое прошло известное количество металла.

В процессе заливки форма испытывает различные воздействия со стороны жидкого расплава. Более плотный контакт образуется в местах, где металл оказывает не только гидродинамическое давление, но и гравитационное воздействие. На эти поверхности давит своей массой металл в процессе заполнения. Для определения взаимодействия металла с формой произвели два измерения шероховатости отливки на одном сечении. Первое измерение производили на поверхности, которая испытывала только гидродинамическое давление, а второе - на поверхности, испытывавшей гидродинамическое и гравитационное давление.

2.6 Методика изучения альфированного слоя и механических свойств отливки

Из отливки «Втулка» вырезали образцы в тех участках, в которых производили измерения шероховатости поверхности. Для измерения глубины альфированного слоя и распределения химических элементов на поверхности образца были проанализированы поверхности, не испытывающие гравитационное давление расплава. Из образцов изготовили шлифы, которые подвергли травлению для выявления структуры. В качестве травителя использовали раствор кислот из одной части плавиковой кислоты и одной части азотной кислоты в трех частях дистиллированной воды.

Измерения микротвердости производили по методу Виккерса (ГОСТ 2999) на микротвердомере ПМТ–3. Вдавливание пирамиды производилось на срезе образца, на расстоянии 0,1 мм от поверхности, которая контактировала с формой и дальше, двигаясь с шагом 0,05 мм вглубь отливки. Нагрузка составляла 0,981 Н (100кгс).

Микроструктуру исследовали на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer.D1m. Также провели анализ этих образцов на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA 3 SBH с приставкой энергодисперсионного анализа Oxford.

Для определения химического состава сплава также использовали эмиссионный спектрометр ARL 4460 (рисунок 8).

Образцы для испытания на ударные изгибы сечением 10х10 мм по ГОСТ 9454–78 и образцы на растяжение диаметром 5 мм по ГОСТ 1497–84 выточили из частей отливки «Втулка». Были проведены измерения механических свойств: ударной вязкости KCU, предела текучести, предела прочности и относительного удлинения на универсальной испытательной машине Instron 5569 и копре маятниковом Instron SI–1M.

2.7 Методика определения точности отливки, полученной по безмодельной технологии

Для анализа размерной точности отливок «Втулка» и «Стойка» использовали бесконтактную систему оптической оцифровки ATOS II XL 400 (AdvancedTOpometricSensor, Германия), которая позволяет оцифровать поверхности объекта и установить отношение между реальным компонентом или моделью и ее цифровым описанием. ATOS работает на принципе проецирования интерференционных полос и считывает информацию при помощи двух цифровых камер. Трехмерные координаты каждой точки вычисляются специальным программным обеспечением на основе параметров уравнений оптических преобразований.

Контроль геометрии отливок проводился путем сравнения трехмерной модели отливки, полученной компьютерной обработкой снятого при оцифровке облака точек, с исходной трехмерной моделью отливки в формате STL. Совмещение моделей проводили по базовым поверхностям, установленным чертежом отливки. В этом случае добиваются наилучшего совмещения между точками, принадлежащими базовым поверхностям сравниваемых трехмерных моделей. Совмещение производится путем минимизации кратчайшего расстояния между совмещаемыми поверхностями [75].

3. Результаты исследования моделирования процесса литья и разработка технологии изготовления опытных крупногабаритных отливок из сплава ВТ20Л

3.1. Результаты экспериментов по определению коэффициента теплопередачи

Прежде чем начать разработку технологии изготовления опытных отливок из титанового сплава по безмодельной технологии в графитовые формы, необходимо определить параметры моделирования процесса литья, а именно коэффициент теплопередачи. Его вычислили применительно к литейной форме (см. рисунок 6), изготовленной путем фрезерования из графитового блока марки ГМЗ, и цилиндрической отливке из сплава ВТ20Л.

Химический состав сплава ВТ20Л (ТУ 1–92–184–91) и состав полученной отливки, по которому производился расчет теплофизических свойств сплава в программе «ProCast», приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Химический состав сплава марки ВТ20Л.

Марка сплава	Содержание компонентов, % масс.										
	Основные компоненты					Примеси					
	Ti	Al	V	Mo	Zr	Fe	Si	O	N	C	H
ВТ20Л (фактический)	Осн.	6,03	1,52	1,64	2,47	0,07	0,04	0,08	0,02	0,10	–
ВТ20Л (ТУ 1–92–184–91)	Осн.	5,50– 6,80	0,80– 2,50	0,50– 2,0	1,50– 2,50	не более					
						0,25	0,15	0,15	0,05	0,10	0,01

Несмотря на то, что сплав известен с 1965 г., данные о его теплофизических свойствах достаточно разноречивы и неполны [89]. В связи с этим по химическому составу полученного сплава был произведен расчет в

программе ProCast значений теплопроводности, энтальпии и плотности в зависимости от температуры.

Результаты расчета теплофизических свойств представлены на рисунке 17. Для того, чтобы понять, насколько хорошо соотносятся расчётные данные с опубликованными ранее, на рисунках также представлены свойства сплава системы Ti–6Al–4V, взятые из литературы [90–94].

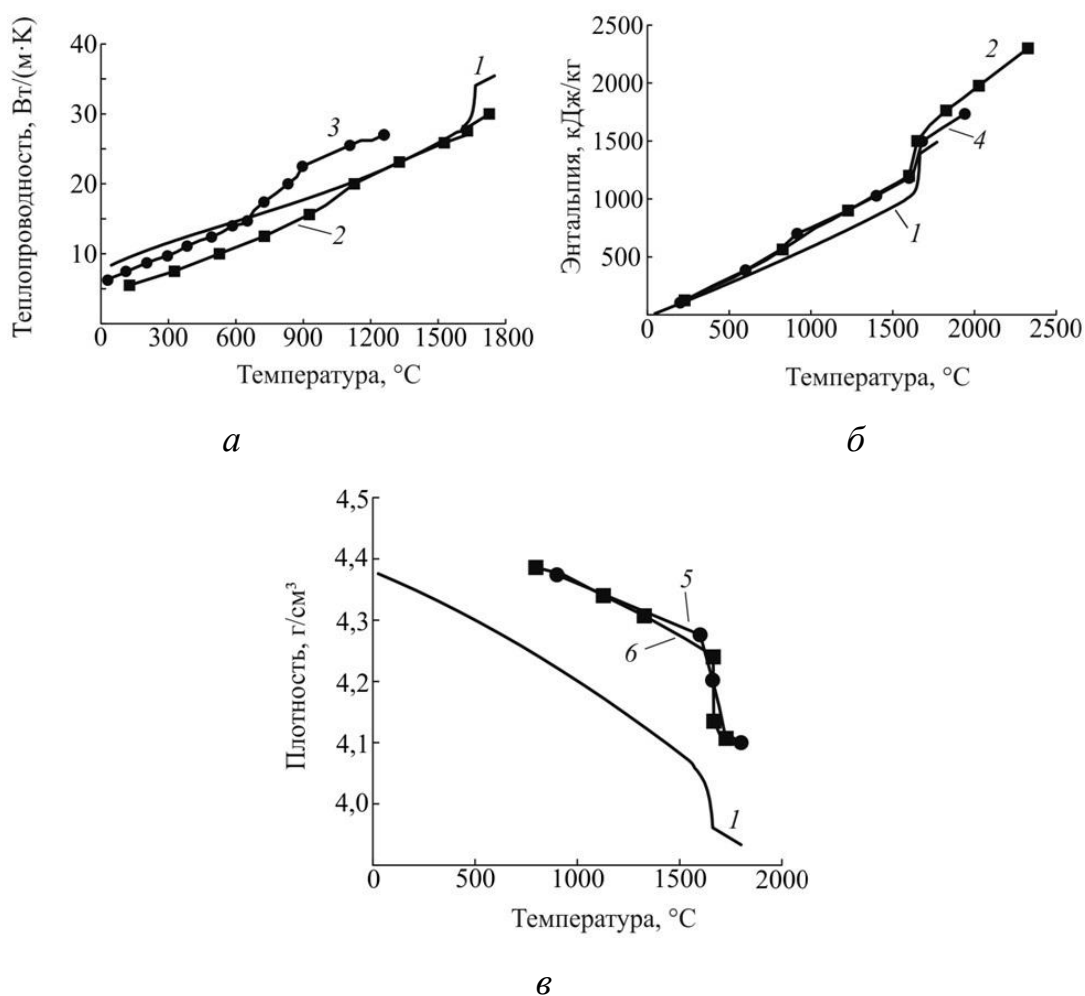


Рисунок 17 – Теплопроводность (а), энтальпия (б) и плотность (в) титановых сплавов VT20Л (1) и Ti–6Al–4V (2–6) в зависимости от температуры:

1– ProCast; 2 – [90]; 3 – [91]; 4 – [92]; 5 – [93]; 6 – [94]

Значения теплопроводности сплава ВТ20Л для твердого и жидкого состояния в интервале температур 20–1800 °С изменяются от 8 до 36 Вт/(м·К), соответственно. Теплопроводность (см. рисунок 17, а), рассчитанная для интервала температур 20–1800 °С в программе ProCast (линия 1), достаточно близка к определённой в работе [90] (линия 2). Также расчетные данные теплопроводности хорошо согласуются с результатами, приведёнными в работе [91] (линия 3) при температуре до 800 °С. При более высоких температурах различия значительны. В целом разница между расчётными значениями и представленными в различных литературных источниках не превышает 20 %.

Теплофизические свойства графита из литературных источников и базы данных программы ProCast рассматривали в работе [97]. Результаты анализа представлены на рисунке 18. Для моделирования были выбраны теплофизические свойства графита МПГ–6 [95], так как по своим характеристикам он мало чем отличается от графита ГМЗ.

Используя расчетные и литературные данные, построили зависимость коэффициента теплопередачи (h) от температуры поверхности отливки. Определили, что максимальное изменение величины h происходит в начальный период после заливки расплава, поэтому поиск коэффициентов теплопередачи производили далее до 1500 °С при шаге 10 Вт/(м²·К). А значения коэффициента теплопередачи ниже 1500 °С на данном этапе моделирования для всех температур составили 50 Вт/(м²·К). Это достаточно низкое значение, поэтому на этом участке определение коэффициентов теплопередачи производили с шагом 5 Вт/(м²·К). Полученный график зависимости коэффициента теплопередачи от температуры поверхности отливки представлен на рисунке 19.

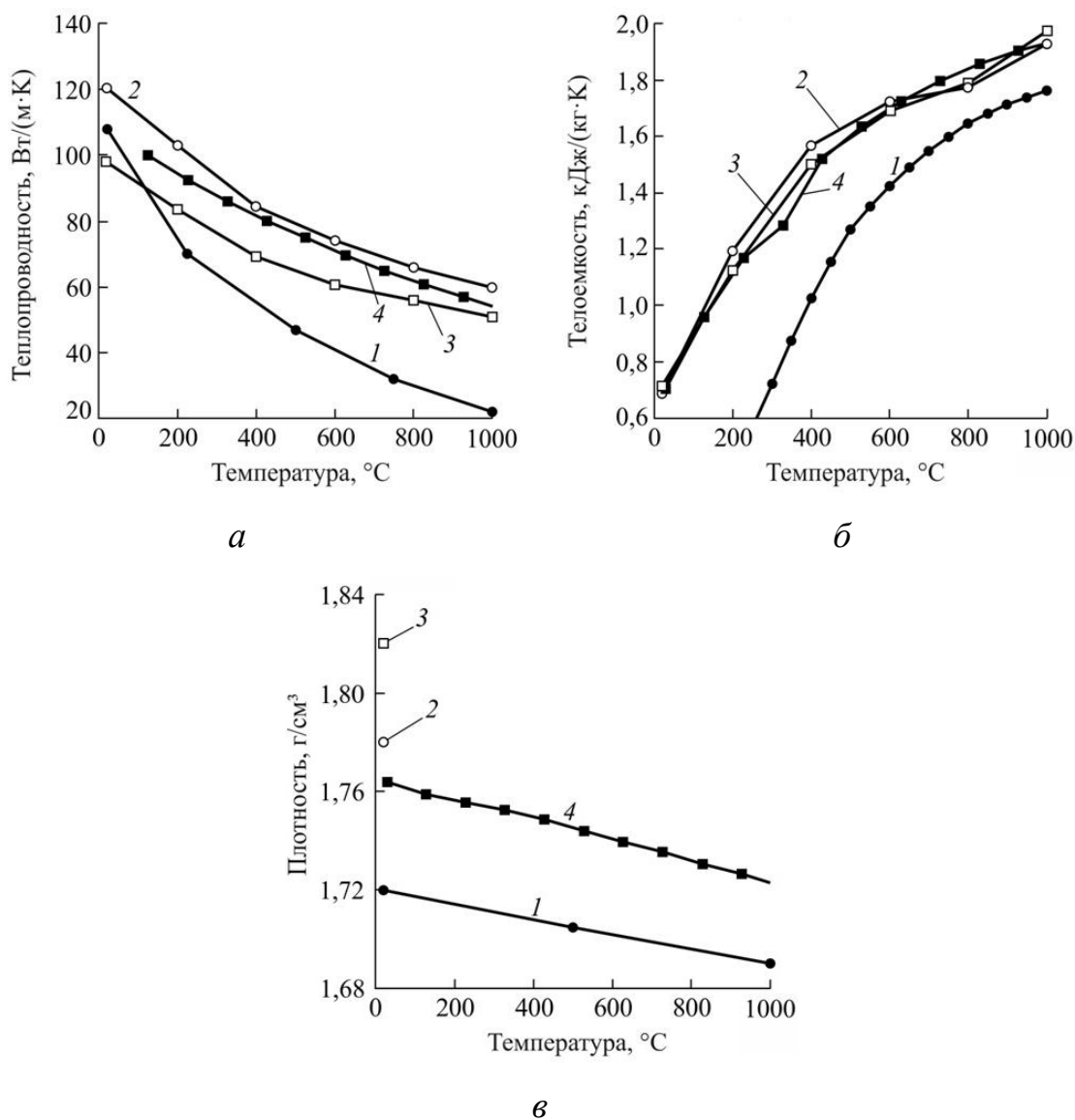


Рисунок 18 – Теплопроводность (а), теплоемкость (б) и плотность (в) графита в зависимости от температуры:
 1 – ProCast; 2 – МПГ-6 [95]; 3 – SGL [95]; 4 – РОСО АХМ-5Q1 [96]

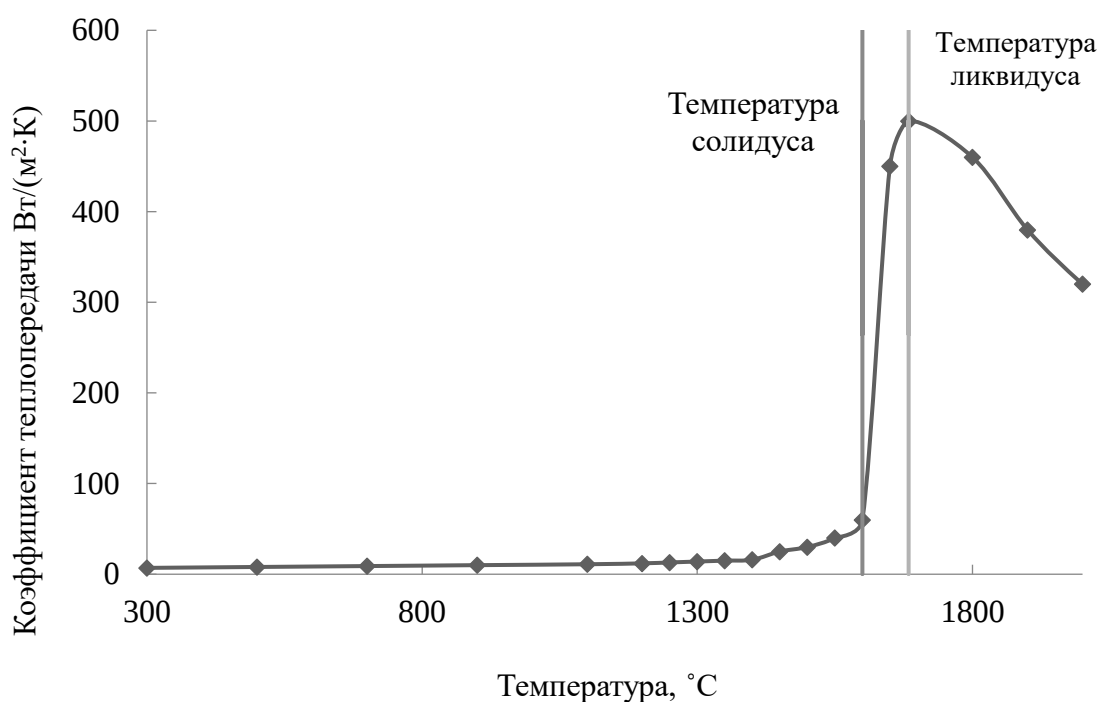


Рисунок 19 – Зависимость коэффициента теплопередачи от температуры поверхности отливки при литье сплава ВТ20Л в графитовую форму

Установлено, что при температурах расплава от начала заливки (2000 °С) до температуры ликвидуса титанового сплава коэффициент теплопередачи растет. Это связано с нагревом формы. Максимальная величина h составила 530 Вт/(м²·К) при температуре ликвидуса сплава на поверхности отливки. В этот момент образовавшаяся тонкая корка металла хорошо прижимается к поверхности формы. Затем с ростом этой корки, после температуры ликвидуса, образуется зазор между расплавом и формой, h резко падает до 70 Вт/(м²·К). Далее h продолжает снижаться из-за увеличения зазора между отливкой и формой.

Такой характер зависимости коэффициента теплопередачи от температуры ликвидуса наблюдается во многих работах для алюминия и чугуна [97– 98].

На рисунках 20 и 21 отражены результаты сопоставления экспериментальных ($T_{31} - T_{39}$) и расчетных, полученных при моделировании

процесса заполнения и затвердевания отливки ($T_{p1} - T_{p9}$), графиков изменения температуры в зависимости от времени, прошедшего с начала заливки, для термопар $T_1 - T_9$.

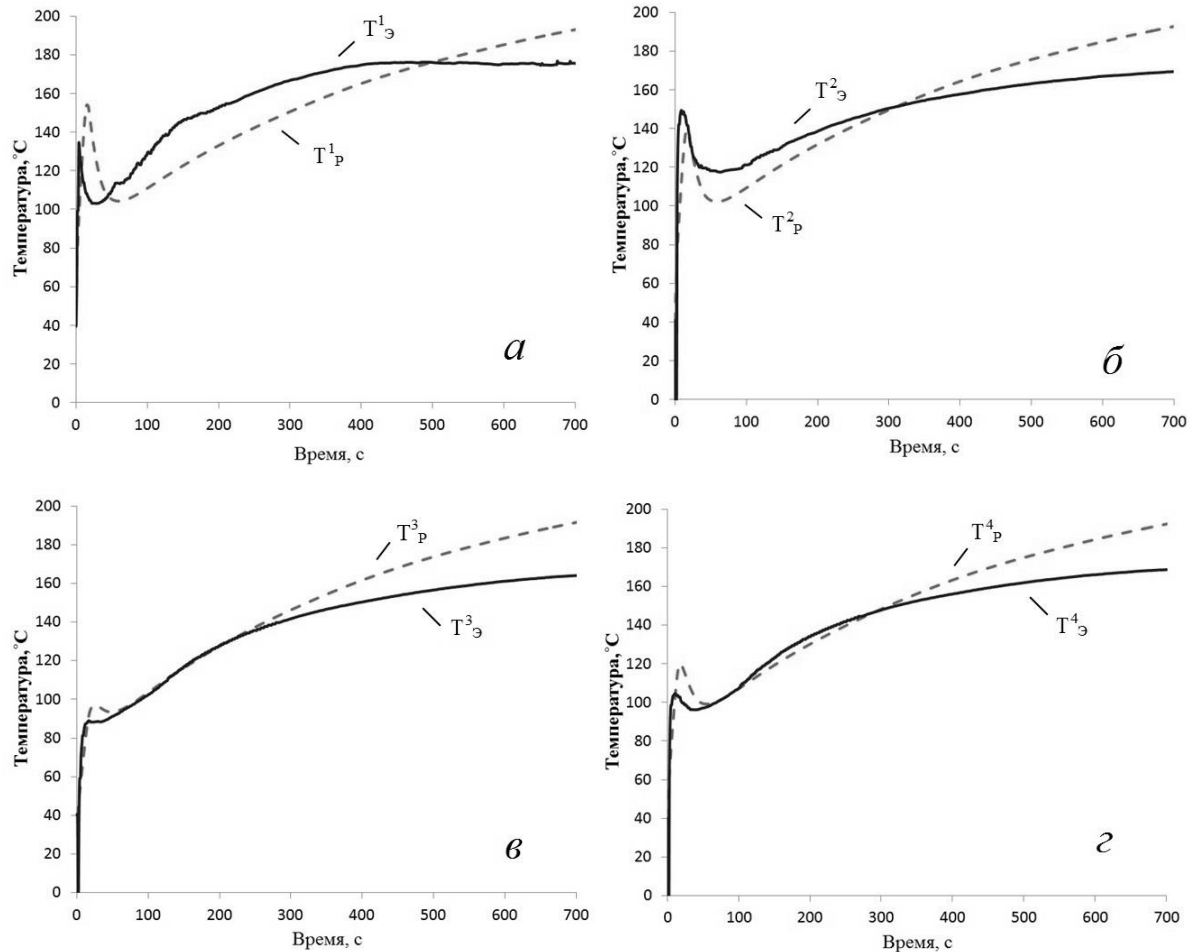


Рисунок 20 – Экспериментальные ($T_{\text{э}}$, сплошные линии) и полученные в процессе моделирования ($T_{\text{р}}$ штриховые) кривые охлаждения для термопар: T^1 (а); T^2 (б); T^3 (в); T^4 (г).

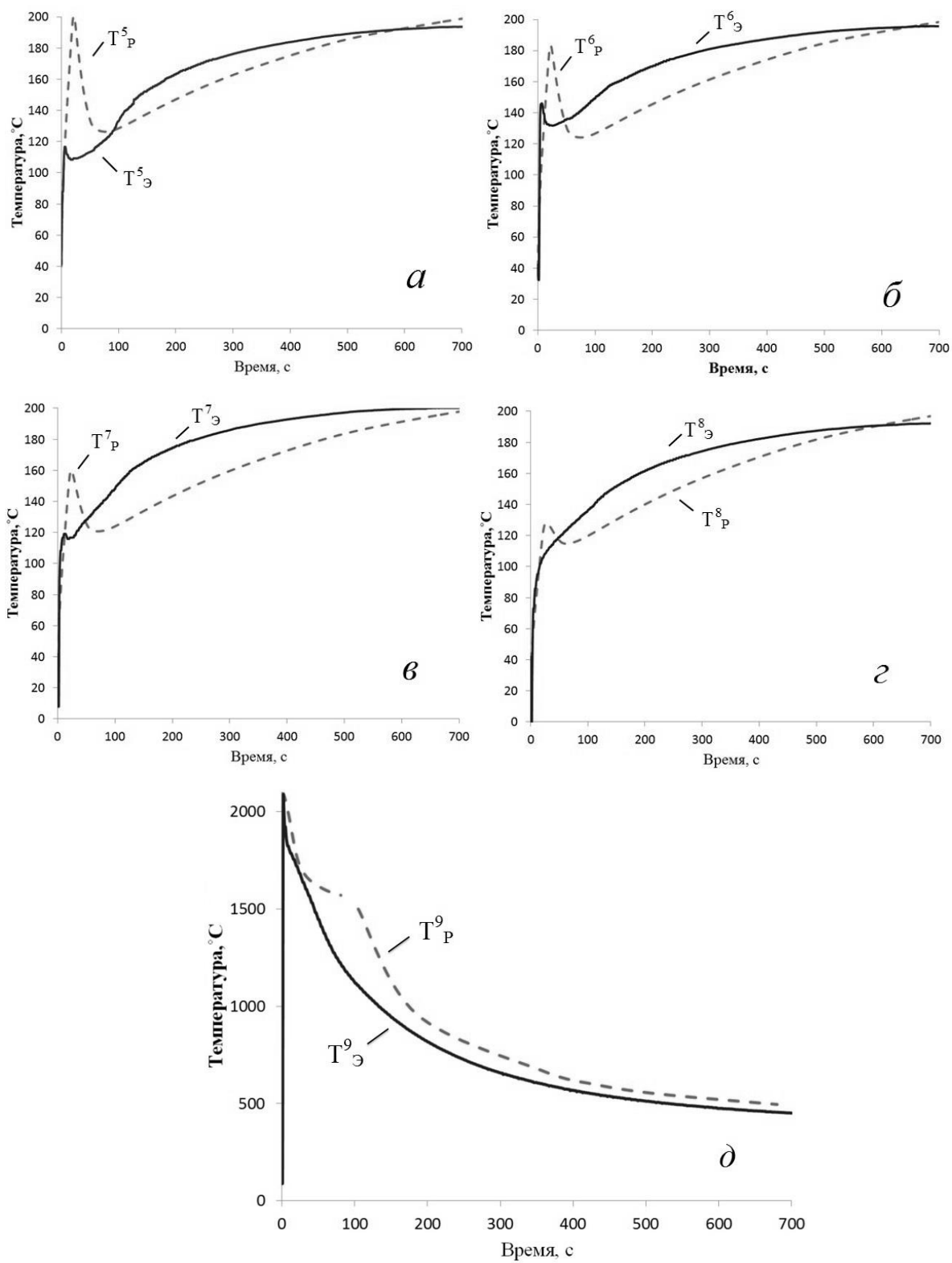


Рисунок 21 – Экспериментальные ($T_{\text{э}}$, сплошные линии) и полученные в процессе моделирования ($T_{\text{р}}$, штриховые) кривые охлаждения для термопар: T^5 (а); T^6 (б); T^7 (в); T^8 (г); T^9 (д).

Разница между экспериментальными и расчетными температурами в форме, за небольшим исключением, не превышает 40 °С.

Сопоставление расчетных и экспериментальных температур в форме и отливке после достижения времени 700 секунд не показано, так как по достижении этого времени разница между этими температурами остается практически постоянной и не превышает 30 °С. Среднее значение функции ошибок составило 16,9°С.

3.2 Результаты измерения жидкотекучести

Также при разработке технологии изготовления отливок произвели оценку жидкотекучести титанового сплава в графитовой и стальной формах. Результаты исследований при стационарной заливке форм представлены в таблице 8. Данные показывают, что материал формы оказывает существенное влияние на ее заполнение титановым сплавом. Длина пробы, залитой в графитовую форму, почти на 40% меньше по сравнению с залитой в стальную.

Таблица 8 – Жидкотекучесть при заполнении различных литейных форм сплавом ВТ20Л.

Марка сплава	Материал формы	Средняя длина залитой пробы, мм
ВТ20Л	Сталь 20	556±21
	Прессованный графит ГМЗ	342±15

Такое соотношение коррелирует с результатами эксперимента [53] для сплава ВТ21Л, так как эти сплавы обладают схожим химическим составом.

Теплоаккумулирующая способность графита МПГ–6, близкого по свойствам к графиту ГМЗ и стали 20, в зависимости от температуры представлена на рисунке 22. Она рассчитана с помощью данных, взятых из литературных источников [99, 100]

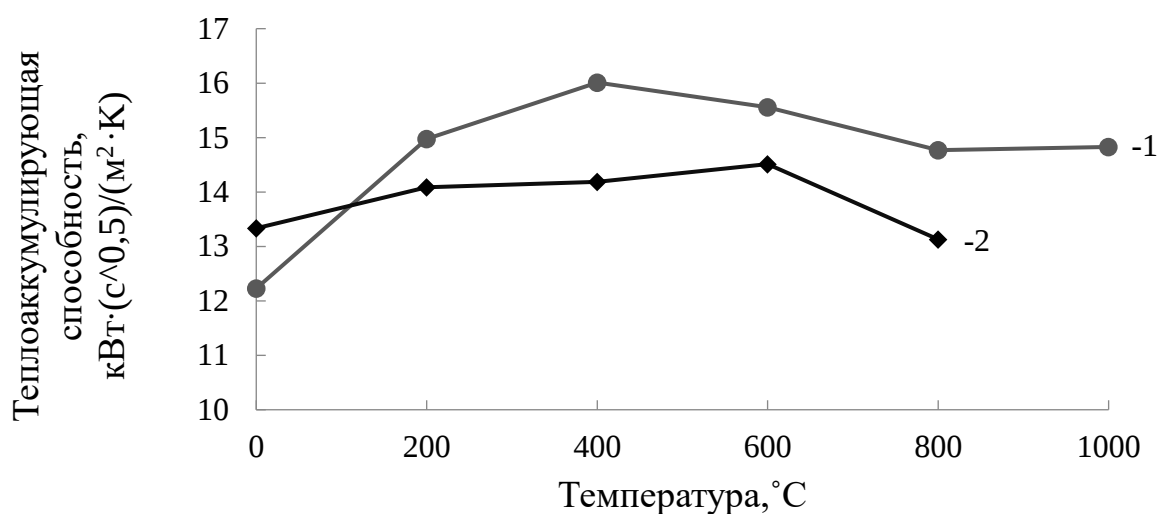


Рисунок 22 – Теплоаккумулирующая способность в зависимости от температуры графита МПГ–6 (1) и стали 15(2)

Для стальной и графитовой формы значения теплоаккумулирующей способности отличаются незначительно.

Теплопроводность графита МПГ–6 [99] и стали 20 [100] в зависимости от температуры представлены на рисунке 23.

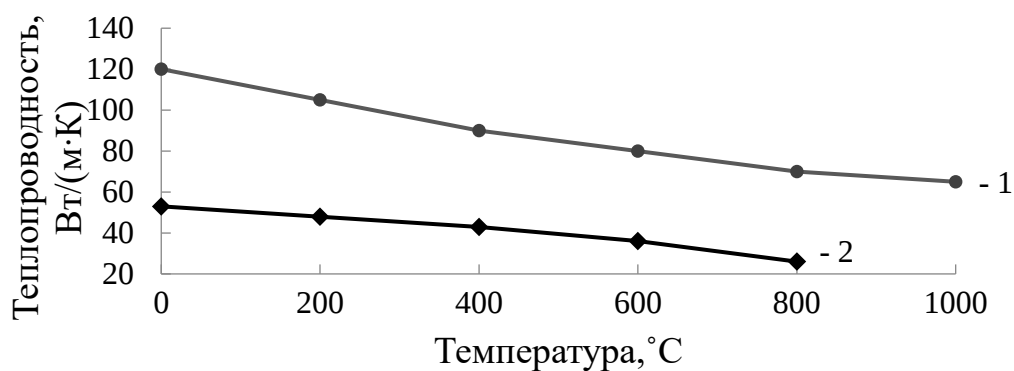


Рисунок 23 – Теплопроводность в зависимости от температуры графита МПГ–6 (1) и стали 15 (2)

Графитовая форма обладает более высокой теплопроводностью, за счет этого осуществляется более интенсивный теплоотвод, и значительно

снижается жидкотекучесть. Повышение температуры заливки титанового сплава существенно повышает заполняемость формы, однако на практике это не применяется, так как плавку ведут в основном в дуговых печах с перегревом сплава не более 100 °С для поддержания «гарнисажа». К тому же в отливках могут образоваться поверхностные и внутренние дефекты (пригар, пористость). Подогрев формы до высоких температур приводит к интенсивному химическому взаимодействию жидкого металла с материалом формы и, соответственно, недопустимому насыщению металла вредными примесями и образованию пригара на отливках [50].

Низкая жидкотекучесть сплава в графитовой форме создает необходимость использования высоких скоростей вращения центробежного стола заливочной печи (200–400 об/мин) для обеспечения заполняемости формы и получения годной отливки. Такие скорости значительно повышают заполняемость металлом формы и способствуют образованию более равномерной структуры по сечению отливки, это подробно рассматривалось в нескольких зарубежных и отечественных работах [101, 102].

3.3 Результаты моделирования процесса литья опытных отливок

Используя экспериментально полученные и литературные данные, была построена литниковая система и проведено моделирование процесса заполнения расплавом ВТ20Л полости литейной графитовой формы и затвердевания отливок «Стойка». Технология их изготовления разработана с учетом возможностей вакуумной дуговой установки «НИАТ 833 Д». Внешний вид отливок «Стойки» с литниковой системой представлен на рисунке 24.

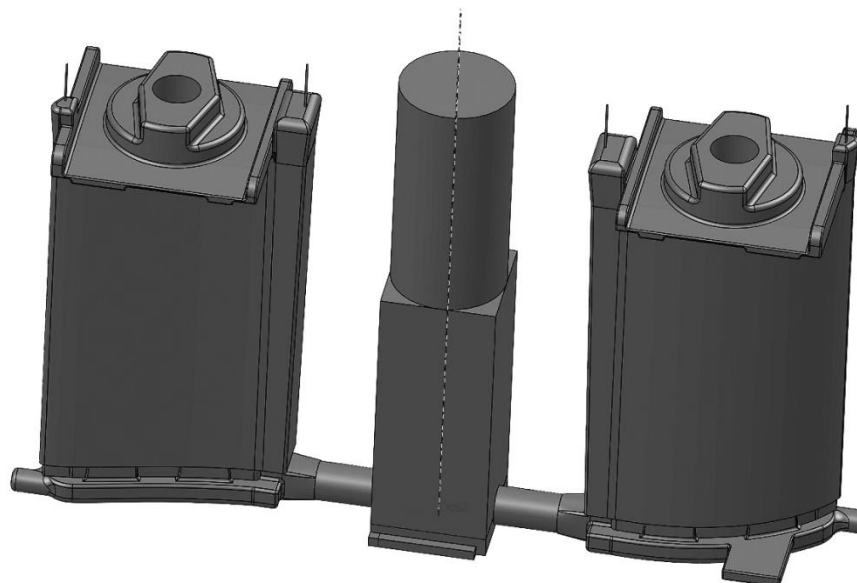


Рисунок 24 – Электронная геометрическая модель конструкции отливок «Стойки» из сплава ВТ20Л с литниковой системой

Разработанная литниковая система для «куста» из двух отливок обеспечивает плавный подвод металла к отливке снизу, через металлоприемник и горизонтальный литниковый ход, который переходит в шесть питателей, расположенных по периметру отливки.

Рассматриваемая отливка имеет массивные части – тепловые узлы, поэтому для предупреждения образования в отливке усадочных раковин и пористости в верхней части отливки устанавливаем прибыль.

В классической методике определения скорости вращения центробежного стола для заливки отливок используют формулу НИАТ [88] (2):

$$P = 2,24 \cdot 10^5 \cdot (n/100)^2 \cdot r^2, \quad (2)$$

где P – давление металла в форме, Па;
 n – число оборотов формы, об/мин;
 r – радиус контейнера, м.

Наилучшие условия питания и газообмена в отливке обеспечиваются, когда нижний предел давления составляет 0,15... 0,2 МПа. Верхний предел давления в отливке не должен превышать прочность формы, для графита ГЭ это 5,9 МПа, для ГМЗ - 13,2 МПа. Когда это значение превышает, необходимо изменить положение отливки в форме или принять меры по усилению формы [2].

Максимальный радиус (r) вращения отливки в заливочном контейнере диаметром 1000 мм равен 0,4 м. Таким образом, число оборотов центробежного стола для формы для отливок из графита «Стойки» варьируется от 200 до 400 об/мин.

Для более точного расчета температуры заливки и числа оборотов при вращении формы, обеспечивающих заполнение формы расплавом, использовали моделирование. Результаты для отливок «Стойки» представлены на рисунке 25. Закрашены незаполненные расплавом области.

Таким образом нашли, что достаточным числом оборотов (n) для формы является 300 об/мин. На изображении обозначены области, в которых усадочная пористость составляет более 5%. В основном пористость располагается в прибылях и литниковой системе, заполнение металлом при заданных условиях происходит равномерно сплошным фронтом движущегося потока, недоливы отсутствуют.

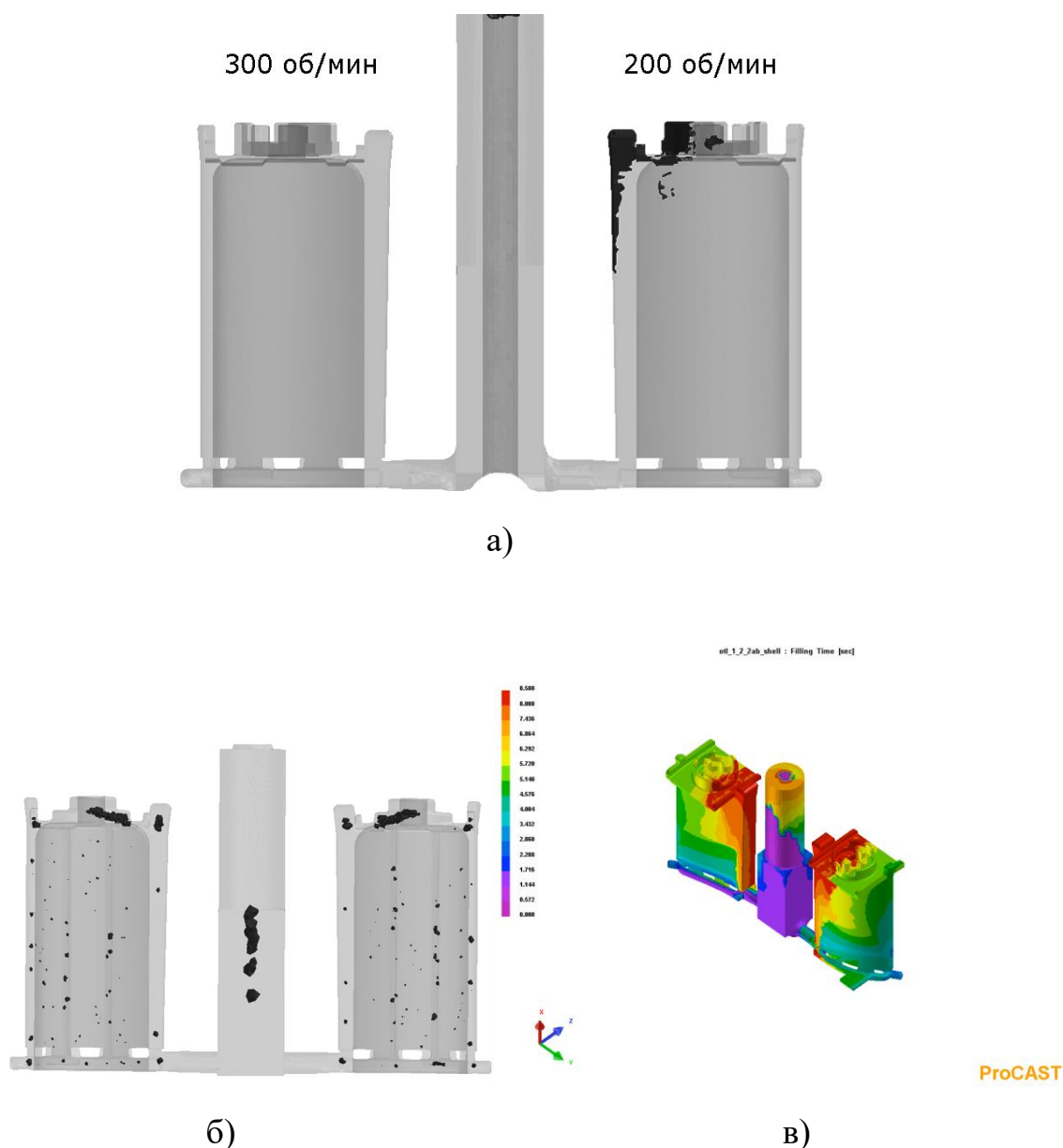


Рисунок 25 – Результаты моделирования процесса заполнения отливки «Стойка» сплавом ВТ20Л: а) заполнение формы расплавом в зависимости от частоты вращения центробежного стола; б) распределение усадочных дефектов в отливке; в) распределение скорости заполнения.

Положительный результат, полученный при моделировании процессов заполнения расплавом ВТ20Л полости графитовой литейной формы и затвердевания отливки «Стойка», позволил разработать литниковую систему и выполнить аналогичный процесс моделирования применительно к

крупногабаритной, тонкостенной отливке «Втулка». Внешний вид её с литниковой системой представлен на рисунке 26.

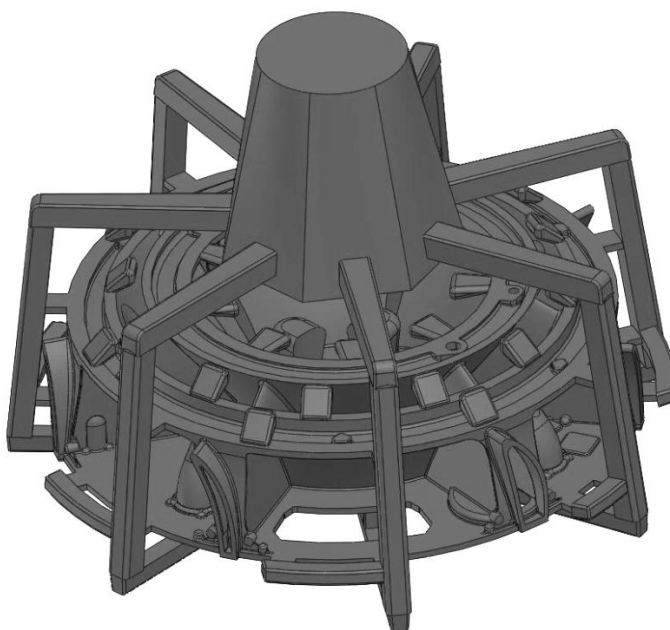


Рисунок 26 – Электронная геометрическая модель конструкции отливки «Втулка» с литниковой системой из сплава BT20Л

При конструировании литниковой системы для этой отливки опирались на классические методики конструирования титановых отливок и литниковых систем, учитывая материальную оснащённость установки «ALD VAR 1500SM–Ti» на ПАО «ОДК-УМПО». Габариты отливки «Втулка» позволяют использовать литниковую систему с верхним подводом металла. В расчетах использовали максимальную скорость вращения центробежного стола плавильной установки – 100 об/мин.

Результаты моделирования для отливки «Втулка», показанные на рисунках 27 и 28, свидетельствуют, что наиболее проблемные с точки зрения заполнения и плотности протяженные тонкие плоскостные и конические элементы отливки оформлены полностью без каких-либо внешних дефектов.

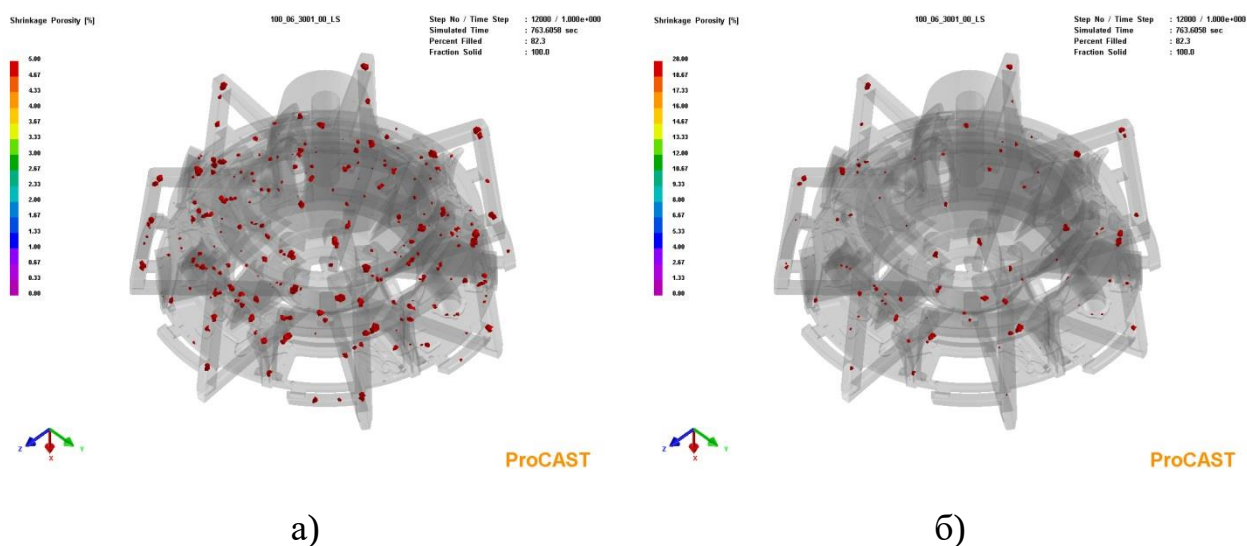


Рисунок 27– Распределение усадочной пористости в результате моделирования отливки «Втулка» а) более 5% б) более 20%

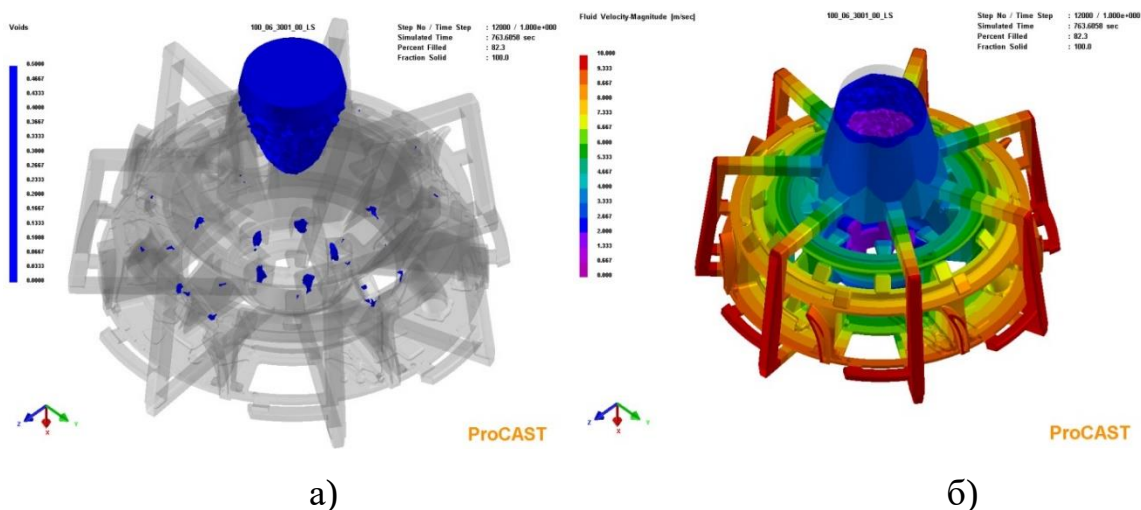


Рисунок 28 – Результаты моделирования: а) усадочные раковины в отливке; б) распределение скорости заполнения

Большая часть рассеянной пористости, наблюдаемой в стенках и других элементах, имеет размеры, вполне устранимые газостатической обработкой. Наиболее крупные поры сосредоточены в прибылях и некоторых утолщенных буртиках.

3.4 Разработка конструкции литейных форм для опытных отливок

По электронным моделям отливок были разработаны конструкции литейных форм.

Общий вид и разрез литейной формы для отливки «Втулка» представлен на рисунке 29. Она состоит из восьмидесяти одного графитового элемента.

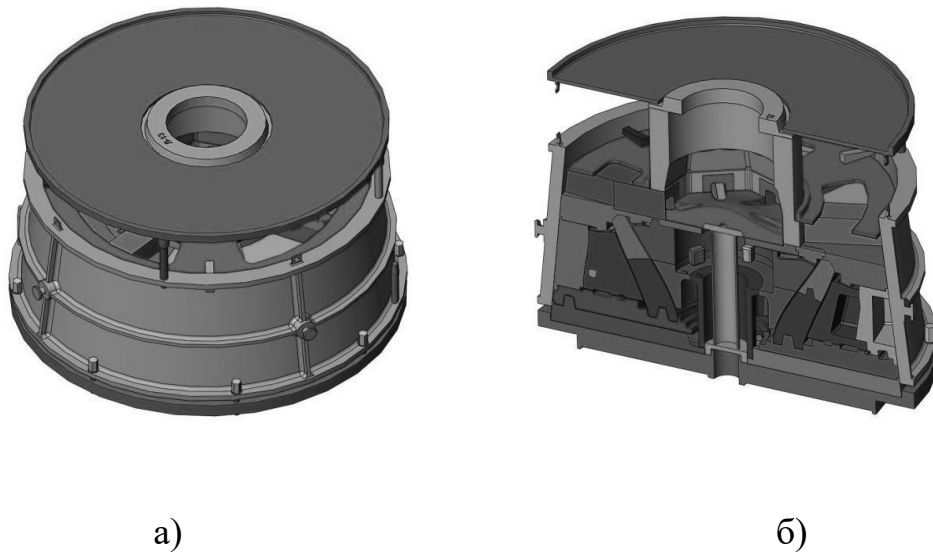


Рисунок 29 – Внешний вид а) и вид в разрезе б) литейной формы для изготовления отливки «Втулка»

Вес формы в сборе: 2200 кг;

Габариты формы: Ø1600 мм, Н=980 мм;

Количество наплавленного и сливаемого металла: 500 кг;

Данная конструкция формы предусматривает пробную единичную заливку с последующей доработкой технологии литья для серийного производства. Так как некоторые элементы формы (до 50%) имеют возможность извлекаться без разрушения, как показано, например, на рисунке 30, то их возможно заменить на металлические из стали 20, и, в итоге, форма будет представлять собой облицованный графитовыми элементами кокиль.

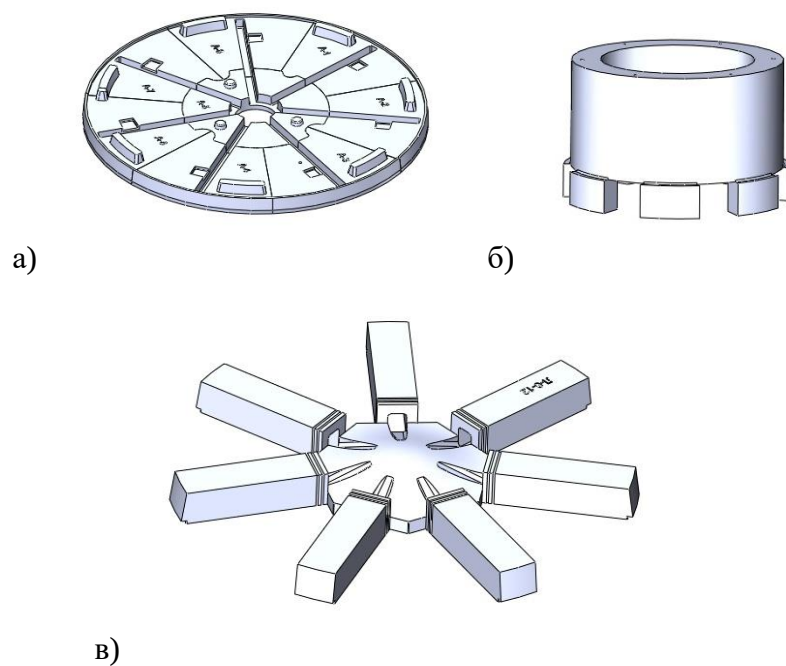


Рисунок 30 – Элементы формы для отливки «Втулка», имеющие возможность извлечения без разрушения: а) литниковый ход; б) литниковая чаша; в) литниковый ход с рассекателем

Общий вид и разрез литейной формы для отливок «Стойки» представлен на рисунке 31.

Она состоит из 11 графитовых элементов, и при серийном производстве также возможна замена частей форм, которые извлекаются без разрушения, на металлические. Общий вид комбинированной формы для отливки «Стойка» представлен на рисунке 32.

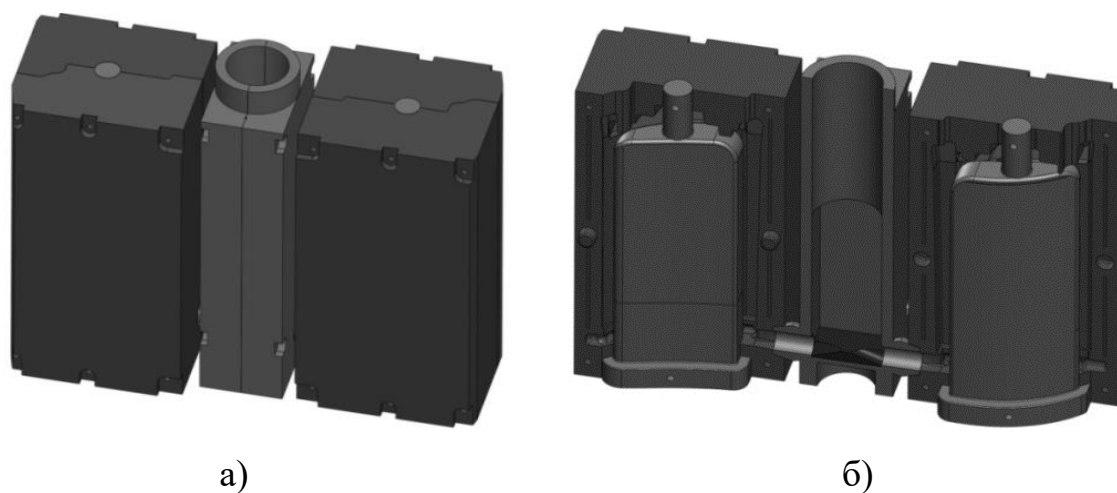


Рисунок 31 – Внешний вид а) и вид в разборе б) литейной формы для изготовления отливок «Стойки»

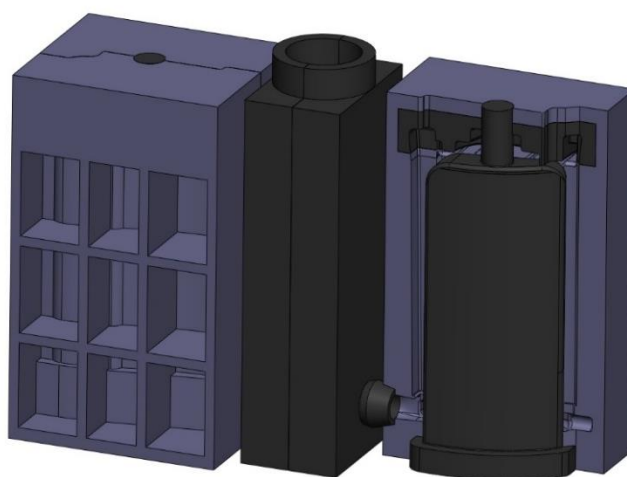


Рисунок 32 – Общий вид литейной формы для изготовления отливки «Стойка» по технологии литья в комбинированную форму

3.5 Результаты экспериментов по разработке клеевых составов

Разработанные конструкции графитовых форм для отливок «Втулка» и «Стойки» состоят из множества элементов. Соединения некоторых из них подразумевает клеевое соединение, кроме этого, в процессе изготовления

может появиться необходимость в ремонте отколовшихся частей формы. Для этого были разработаны клеевые составы. Чтобы выбрать наиболее подходящий, были проведены испытания предела прочности на сдвиг клеевых соединений. Результаты представлены на рисунке 33. Результаты испытаний для клея IV (с большим содержанием графита) не представлены, так как образцы, полученные с помощью этого клея, разрушились при извлечении из струбцины. Из графика видно, что с увеличением температуры склеивания прочность соединений снижается. Максимальная прочность клеевого соединения при температуре 200 °С получается при использовании клея I (Г42П32С26), содержащего 42% графита, 32 % пульвербакелита и 26% спирта (% масс.) и составляет $10,0 \pm 1,3$ МПа. При этой температуре клей полностью отверждён, и поэтому достигается максимальная возможная прочность. При температуре склеивания 400 °С прочность на сдвиг для образцов из всех клеев составляет ≈ 5 МПа при склейке образцов из графита ГМЗ и ≈ 3 МПа при склейке образцов из графита ГЭ. Снижение прочности связано с началом термодеструкции пульвербакелита. При температурах склеивания 600 и 800 °С прочность составляет ~ 1 МПа вне зависимости от того, какой клей и графит используются. При этих температурах термодеструкция пульвербакелита должна быть практически полностью завершена, и в шве должен присутствовать только коксовый остаток. Полученные значения прочности практически не уступают значениям, полученным при использовании модифицированных смол. Лишь при температуре 600 °С модифицированные смолы дают большую прочность соединения – 2–3 МПа [30, 35].

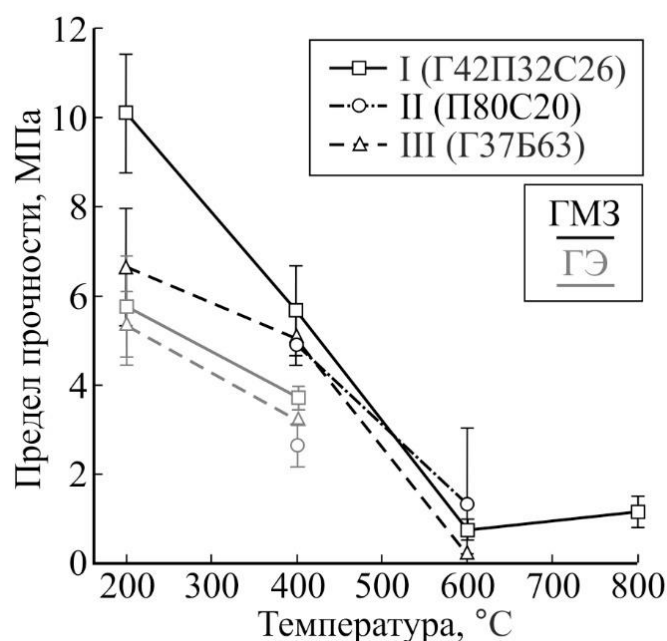


Рисунок 33 – Предел прочности на сдвиг клеевых соединений, полученных с использованием клеев I, II, III и графитов марки ГМЗ и ГЭ

Видно, что при использовании бакелитового лака в качестве основного связующего (клей III рисунок 33) прочность клеевого соединения уступает клеям на пульвербакелите при температуре склеивания от 200 до 400 °C, при более высокой температуре прочность клеевого соединения становится практически одинаковой независимо от использованного связующего за счет интенсивной термодеструкции смол. Таким образом, использование пульвербакелита в качестве связующего обеспечивает более высокую прочность клеевого соединения.

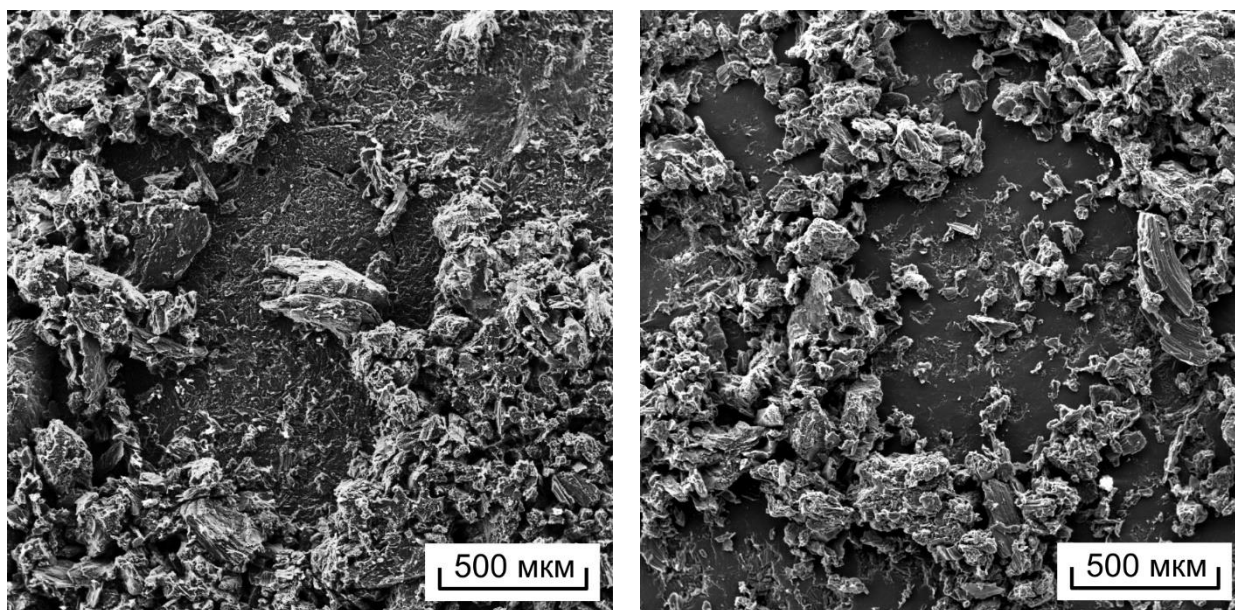
Марка склеиваемого графита также влияет на прочность соединения. Соединения, полученные с использованием образцов из графита марки ГМЗ (черные линии) прочнее, чем полученные с использованием образцов из графита ГЭ (серые линии).

При испытаниях клеевых соединений, полученных с использованием образцов из графита марки ГЭ, склеенных при температуре 200 °C, часть образцов разрушилась вне клеевого соединения (отрыв произошёл по

графиту). Как было указано ранее (см. таблицу 5), предел прочности на изгиб графита ГЭ составляет 5,9 МПа, что близко к прочности клеевого соединения при этой температуре склеивания. Разрушение же образцов, полученных с использованием графита марки ГМЗ, всегда происходило по клеевому соединению, так как предел прочности на изгиб этой марки графита равен 13,2 МПа.

Важное требование к клею, используемому при склеивании элементов графитовых форм, – минимальное количество газа, выделяемого в процессе заливки формы. Очевидно, что чем выше температура нагрева при склеивании, тем меньше вероятность того, что в отливке в местах, находящихся вблизи клеевых швов формы, будет наблюдаться газонасыщенный слой, образование которого связано с взаимодействием расплава с продуктами термодеструкции связующего. Таким образом, следует производить склейку графита при температуре 400 °С, так как при этом достигается удовлетворительная прочность клеевого соединения и частично проходит термодеструкция.

На рисунке 34 представлены фрактограммы поверхностей разрушения клеевых соединений, полученных с использованием образцов из графита марки ГМЗ при температурах 200 и 800 °С. В обоих случаях на поверхности образца наблюдаются частицы графитового наполнителя, покрытые смолой. Поверхность образца на изломе клеевого соединения, полученного при температуре 200 °С, более шероховатая, что свидетельствует о разрушении по этой поверхности. Поверхность образца на изломе клеевого соединения, полученного при температуре 800 °С, более гладкая, что говорит о слабой адгезии между графитом и клеем, а значит, более лёгком отрыве без разрушения поверхности образца. Это подтверждают результаты прочностных испытаний на сдвиг (рисунок 33).



а)

б)

Рисунок 34 – Фрактограмма поверхностей разрушения клеевых соединений образцов из графита марки ГМЗ, полученных при температуре склеивания 200°С (*а*) и 800°С (*б*) (СЭМ)

Была изучена область образца, прилегающая к клеевому соединению. Характерной особенностью этой области является наличие свободной поверхности клея, который был выдавлен на поверхность графитового образца из зазора при сжатии образцов струбциной. На рисунке 35, *а* представлена микроструктура образцов, склеенных при температуре 200 °С, в зоне нахождения излишков клея, выдавленного при склеивании из клеевого шва. Вытекшие излишки клея видны в нижней части рисунка, а графит, не покрытый клеем, - в верхней его части. Слой клея полностью покрывает поверхность графита, наблюдаются лишь незначительные несплошности в виде пор. На образце, склеенном при температуре 400 °С, на слое клея появляются трещины, которые обозначены на рисунке 35, *б* стрелками. Также на этом рисунке показана область с трещиной при большом увеличении. При температуре склеивания 800 °С (рисунок 35, *в*) слой клея практически весь покрыт трещинами. Растрескивание клея при нагреве является одной из причин снижения прочности клеевого соединения и возникает вследствие

термодеструкции связующего и различий коэффициентов термического расширения (КТР) клеевого соединения и графита.

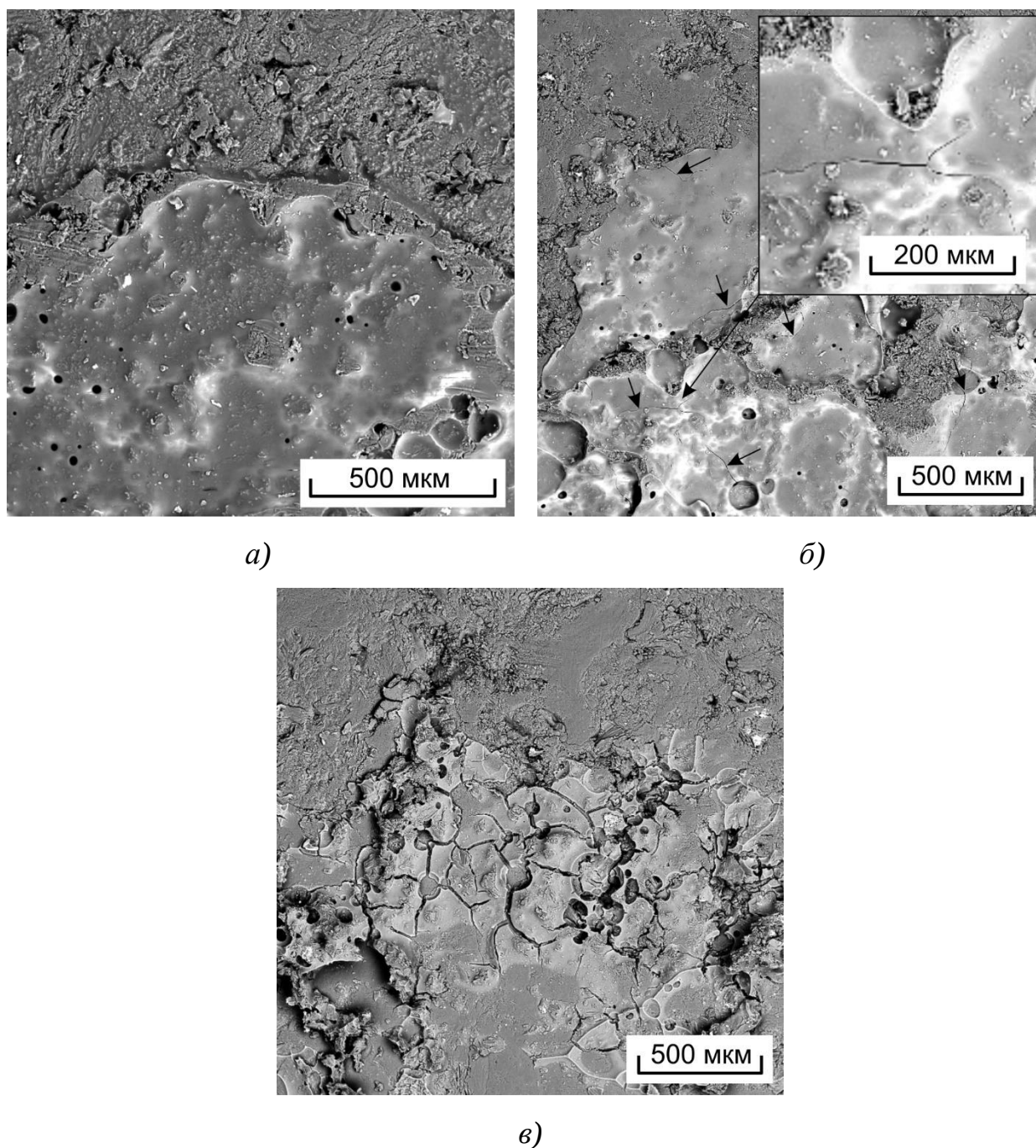


Рисунок 35 – Растёкшиеся излишки клея на поверхности образцов, склеенных при температуре склеивания 200 °С (а), 400 °С (б) и 800°С (в) (СЭМ)

Склеенные образцы разрезали в направлении, перпендикулярном клеевому соединению, и готовили шлифы. Микроструктура клеевого соединения, полученного с использованием образцов из графита марки ГМЗ и клея I (Г42П32С26) при температуре склеивания 200 °С, представлена на рисунке 36, *а*.

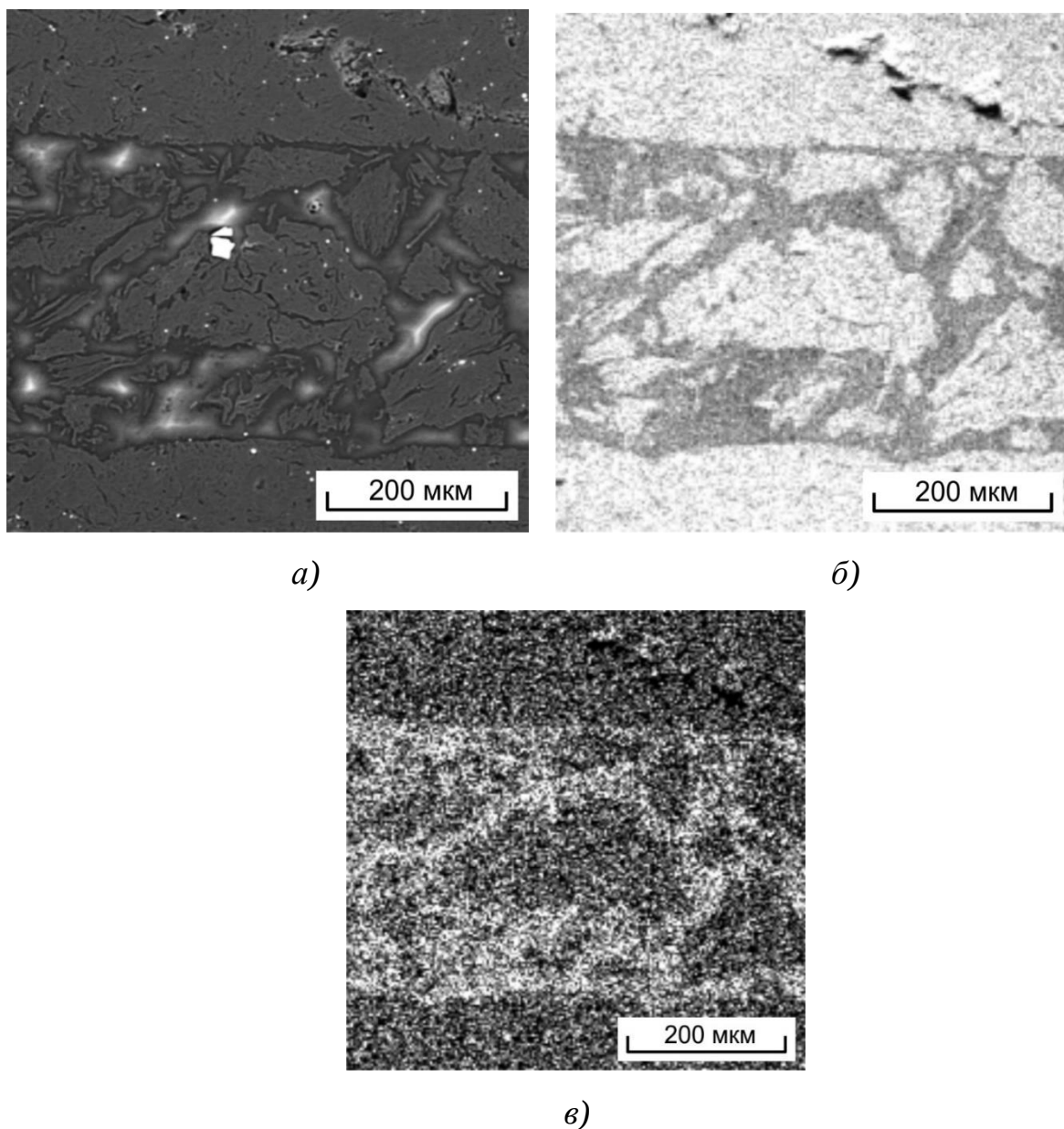


Рисунок 36 – Микроструктура клеевого соединения, полученного с использованием образцов из графита марки ГМЗ и клея I (Г42П32С26) при температуре склеивания 200°С (*а*). Карта распределения углерода (*б*), кислорода (*в*) (СЭМ)

Ширина клеевого шва значительно меняется и составляет 100–400 мкм. Был проведён микрорентгеноспектральный анализ зоны клеевого шва. На рисунке 36, б представлено распределение углерода, а на рисунке 36, в - кислорода в клеевом шве. Видно, что большую площадь шва занимают зёрна графита, вокруг которых располагается отверждённый пульвербакелит. Доля графита и полимеризованной смолы в клеевом шве не одинакова по его длине. Имеются области, где практически отсутствует полимеризованная смола.

3.6 Изготовление графитовых форм

Формообразующие части литейных форм получали механической обработкой графитовых блоков марки ГМЗ и ГЭ (рисунок 37).



Рисунок 37 – Изготовление элементов графитовой формы на станке Dynamic 3000 FC

Обязательной механической обработке подвергались и места сопряжения частей форм. В качестве инструмента для фрезерования применяли спиральные концевые цилиндрические и радиусные фрезы с алмазным покрытием и покрытием Al_2O_3 . Параметры шага вертикальной подачи (шаг по оси Z), скорости резания на зуб V_c , вертикальной подачи F_z ,

подачи на зуб F и скорость вращения инструмента S выбирались в зависимости от параметров инструмента, основываясь на рекомендациях производителей инструмента.

Полученные элементы форм после изготовления собрали воедино. Для этого использовали бобышки и замки, выточенные в частях формы, клеевые смеси, шпилечные соединения, кожухи и поддоны. Зазоры между частями формы при проектировании устанавливались равными 0,2 мм [103].

С использованием клея I (Г42П32С26) был осуществлён ремонт элемента формы, полученного фрезерованием из графита марки ГМЗ. В месте нарезки резьбы откололась небольшая часть. Клей наносился на отколовшуюся часть и на ответную часть элемента формы. Нагрев осуществили пропановой горелкой. На рисунке 38, *а* показано место вклейки отколовшегося элемента. Внешний вид элемента формы после зачистки показан на рисунке 38, *б*.

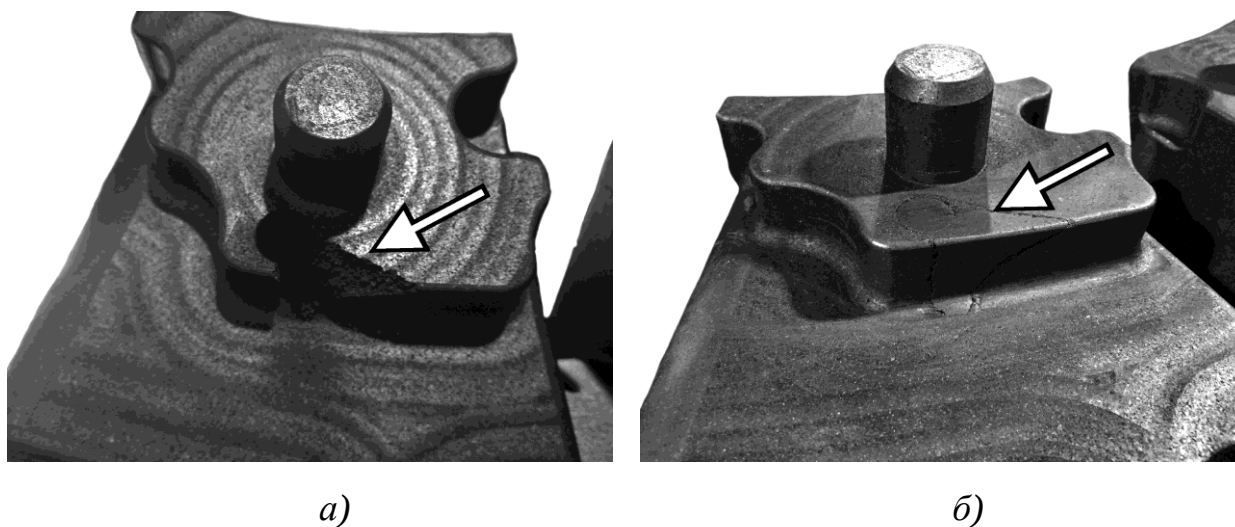


Рисунок 38 – Элемент графитовой формы перед вклейкой отколовшейся части (*а*) и после вклейки и зачистки места склеивания (*б*)

Отремонтированный таким способом элемент был использован для сборки литейной формы, предназначенной для получения отливки «Втулка».

3.7 Результаты изучения шероховатости поверхности графитовых форм

Шероховатость поверхности формы является важным технологическим параметром, влияющим на формирование поверхности отливки [104]. Шероховатость поверхности изучали на фрезерованных поверхностях графитов ГМЗ и ГЭ. Внешний вид образцов и расположение поверхности, на которой проводили измерения, изображены на рисунке 39.

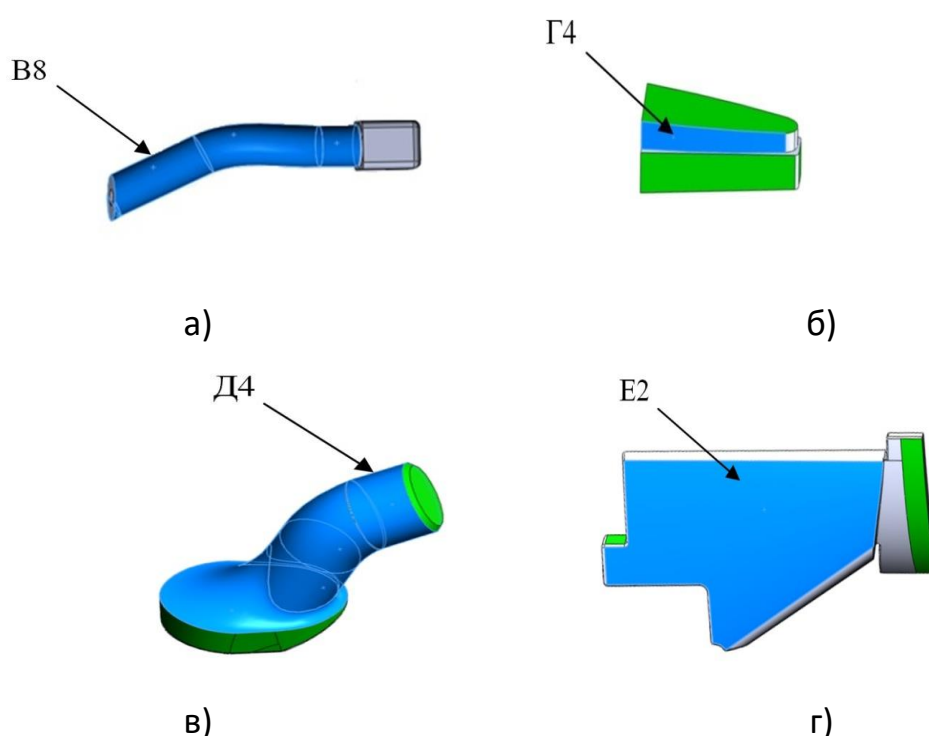


Рисунок 39 – Поверхности элементов литейной формы– (а) В8, (б) Г4, (в) Д4 и (г) Е2, для которых определяли шероховатость

Поверхность элемента В8 была получена сферической фрезой диаметром 6 мм и радиусом режущей кромки 3 мм (D6R3) с постоянным шагом по оси Z 0,18 мм. Для обработки вертикальной поверхности образца Г4 использовали цилиндрическую концевую фрезу диаметром 12 мм со сменными пластинами, режущая кромка которой имеет радиус 1,5 мм

(D12R1,5), шаг по оси Z был постоянный и составлял 2 мм. Образцы Д4 и Е2 обрабатывались одной сферической фрезой диаметром 12 мм и радиусом режущей кромки 6 мм (D12R6), однако для поверхности образца Е2 использовалась растровая стратегия обработки. Она основана на проецировании растрового набора кривых на модель детали вдоль оси Z [105]. Шаг задает расстояние между соседними сегментами проецируемого набора кривых (шаг обработки). Значение вычислено автоматически с помощью программы Powermill, так что высота гребешка будет не выше значения 0,36 мм. За высоту гребешка принимается толщина материала, оставшегося между соседними проходами. Шаг по оси Z при обработке поверхности образца Д4 был постоянным и составлял 0,3 мм.

В результате определили, что элементы литейных форм обладают высоким качеством поверхности, значения Ra которого варьируется от 3,5 до 5,7 мкм. Эти значения представлены в таблице 9 и 10.

Таблица 9 – Результаты измерения шероховатости поверхности элементов литейной формы, изготовленной из графита марки ГМЗ, в зависимости от режимов фрезерования.

Режимы фрезерования:									
Элемент	Режим обработки						Шероховатость		
	Инструмент	Шаг по оси Z, мм	V _c , м/мин	F _z , мм	S, об/мин	F, мм/мин	R _a , мкм	R _z , мкм	R _{max} , мкм
B8	D6R3	0,18	220	0,2	11671	4668	6,25	42,58	40,24
							5,84	33,69	53,06
							5,72	37,74	66,08
							4,71	35,11	42,70
							5,58	36,54	65,12
	Среднее значение						5,62	37,13	53,44
Г4	D12R1,5	2	500	0,1	13263	3979	4,03	31,09	43,28
							4,11	29,82	62,23
							3,17	21,84	46,39
							2,65	24,12	34,06
							3,66	27,88	41,33
	Среднее значение						3,52	26,95	45,46

Поры на стыке зерен графита образуют неровности на поверхности. Пористость графита ГЭ выше, чем у ГМЗ на 5%, но это не оказывает существенного влияния на качество поверхности.

Таблица 10 – Результаты измерения шероховатости поверхности элементов литейной формы, изготовленной из графита марки ГЭ, в зависимости от режимов фрезерования.

Элемент	Режим обработки						Шероховатость		
	Инструмент	Шаг по оси Z, мм	V _c , м/мин	F _z , мм	S, об/мин	F, мм/мин	R _a , мкм	R _z , мкм	R _{max} , мкм
Д4	D12R6	0,3	500	0,1	13263	3979	3,34	19,79	29,55
							4,60	30,29	43,82
							3,17	23,04	43,59
							4,31	22,18	33,65
							3,43	30,34	45,12
	Среднее значение						3,77	25,13	39,15
Е2	D12R6	0,36 (растровое)	500	0,12	13263	4775	5,29	34,42	64,99
							4,77	31,89	38,61
							6,99	42,74	84,62
							4,32	31,22	48,21
							6,79	43,02	58,57
	Среднее значение						5,63	36,66	59,00

4. Результаты изготовления опытных отливок и исследования их взаимодействия с формой

4.1 Изготовление опытных отливок

На следующем этапе произвели плавку и заливку металла в графитовые формы. После окончания заливки камера заполнялась аргоном с целью ускорения процесса охлаждения формы. После выдержки в этой атмосфере в течение 2 часов, контейнер с формой извлекался из камеры установки и транспортировался на участок выбивки формы. Там производилась выбивка, обрубка литниковых систем. Визуальный осмотр отливок (рисунок 40 и 41) не обнаружил наличие на них поверхностных дефектов типа недоливов, неспаев и т.п., что свидетельствует об эффективности разработанной литниковой системы, обеспечивающей качественное заполнение формы.



Рисунок 40 – Отливка «Втулка»



Рисунок 41 – Отливка «Стойка»

4.2 Анализ шероховатости поверхности отливок и форм после заливки

Затем провели анализ шероховатости поверхностного слоя отливок. Исследования проводились на отливке «Втулка» (рисунок 3 а), так как её изготовление осуществлялось в более «жёстких» условиях взаимодействия металл-форма по сравнению с отливкой «Стойка» (рисунок 3 б): расход металла на изготовление одной отливки более чем в 2,0 раза выше. Кроме этого, габариты отливки «Втулка» существенно превышают габаритные размеры отливки «Стойка», что приводит к формированию более высоких давлений на материал литейной формы со стороны расплава в поле центробежных сил.

Для исследований выбрали участки отливки «Втулка», представленные на рисунке 42, и определили количество металла, которое пройдет через эти участки отливки. Для этого массу металла, прошедшую через сечение отливки, разделили на площадь этого сечения. Удобнее всего производить расчет на литниковых каналах и перешейках прибыли отливки, так как через них проходит известное количество металла.

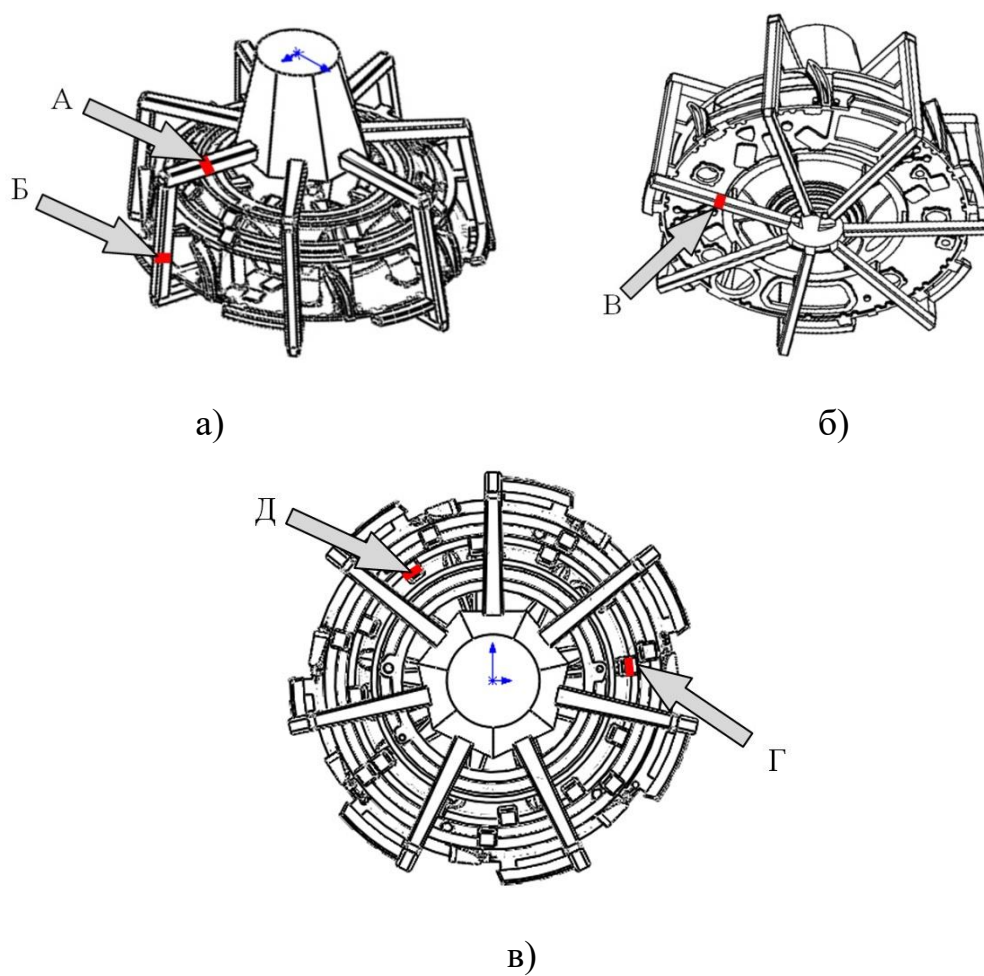


Рисунок 42 – Расположение поверхностей (а) А и Б, (в) В, (б) Д и Г на отливке «Втулка», выбранных для исследования взаимодействия с формой

Часть поверхностей для проведения измерений располагаются на формообразующих участках литниковой системы по уменьшению сечения (А, Б и В). Другая часть расположена на формообразующих проливной и закрытой прибылях (Д и Г). Количество металла, пройденное через сечение отливки на данных участках, меняется от $9,6 \text{ г/мм}^2$ (на участке А) до $0,3 \text{ г/мм}^2$ (на участке Д).

Для оценки взаимодействия металла с поверхностью графитовой формы произвели измерения шероховатости поверхностей отливки и формы после контакта с металлом на тех же участках, через которое «прошло» известное (расчётное) количество жидкого металла. Результаты измерения представлены в таблицах 11 и 12, где А1, Б1, В1, Г1 и Д1 - участки поверхности на отливке,

которые соответствуют участкам на литейной форме А, Б, В, Г и Д, соответственно. Для обозначения участков формы в исследуемых местах после изготовления отливки к названию элемента добавляется «'» (например, А').

Таблица 11 – Шероховатость поверхностей в отливке в зависимости от массы металла, проконтактировавшего с формой.

Элемент	Масса металла пройденного через сечение, г/мм ²	Шероховатость								
		R _a , мкм			R _z , мкм			R _{max} , мкм		
		Мин.	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.
А1	9,6	2,17	3,46	4,78	12,41	21,19	32,32	14,31	31,27	45,16
Б1	9,0	1,804	2,89	5,755	8,737	13,71	25,16	10,03	21,93	45,78
В1	8,3	1,103	1,74	2,41	6,53	8,80	11,98	9,75	13,08	19,24
Г1	1,6	1,35	1,57	1,99	6,23	7,52	9,89	9,91	12,66	18,84
Д1	0,3	0,94	1,34	2,01	5,40	7,79	11,12	6,76	14,89	32,67

Таблица 12 – Шероховатость поверхности литейной формы после удаления отливки.

Элемент	Масса металла пройденного через сечение, г/мм ²	Шероховатость								
		R _a , мкм			R _z , мкм			R _{max} , мкм		
		Мин.	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.
А'	9,6	3,60	6,26	8,11	36,85	45,02	56,75	61,17	81,68	120,60
Б'	9,0	2,85	3,95	5,39	18,62	27,33	36,59	24,10	44,33	75,96
В'	8,3	4,83	7,15	9,18	35,99	42,98	50,1	43,13	65,45	97,98
Г'	1,6	4,96	5,61	6,43	27,99	32,07	35,34	39,14	44,63	50,28
Д'	0,3	1,84	2,70	3,17	14,62	21,37	27,43	20,81	43,81	59,12

Следует отметить, что в процессе заливки форма испытывает различные воздействия со стороны жидкого расплава. Более плотный контакт образуется в местах, где металл оказывает не только гидродинамическое давление, но и гравитационное воздействие. В связи с этим были проведены замеры

шероховатости поверхностей отливки в зависимости от условий течения расплава в одном и том же сечении. Результаты представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Шероховатость поверхности участка литникового хода в зависимости от испытываемого давления со стороны расплава.

Поверхность	Условия литья	Шероховатость		
		R _a , мкм	R _a , мкм	R _a , мкм
Б1 (нижний литник)	Гидродинамическое и гравитационное воздействие	2,42	13,19	28,28
		2,24	29,49	115,8
		1,68	9,51	17,87
		1,60	7,97	10,97
		2,84	14,4	27,86
	Среднее значение	2,16	14,91	40,16
Б1' (нижний литник)	Гидродинамическое воздействие, (верх)	2,41	11,98	19,24
		1,61	7,40	9,75
		1,86	9,75	11,76
		1,69	8,36	11,33
		1,10	6,53	13,29
	Среднее значение	1,74	8,80	13,08

В процессе заполнения расплавом полости литейной формы происходит активное взаимодействие расплава с её поверхностью. В местах, где расплав оказывает на поверхность формы не только гидродинамическое воздействие, но и гравитационное, шероховатость поверхности отливки выше (см. таблицу 13 и рисунок 43). Это обуславливается тем, что в этих местах происходит более сильный механический контакт расплава с формой, поверхностные слои формы подвергаются большей эрозии, и металл лучше заполняет образующиеся в них неровности.

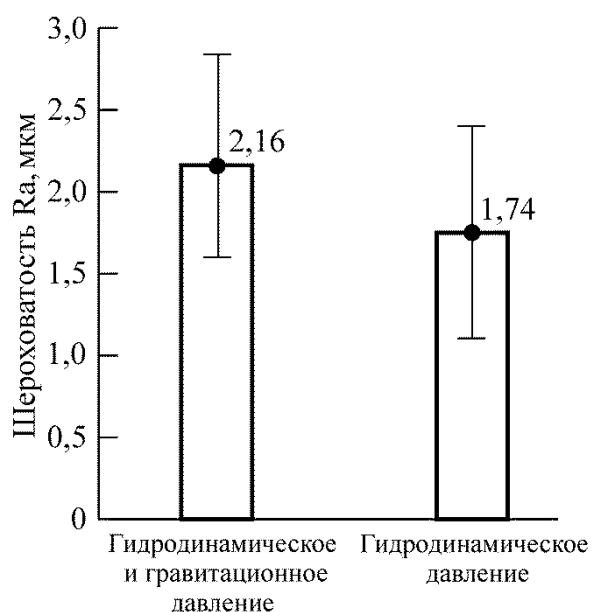


Рисунок 43– Значения шероховатости поверхности отливки в зависимости от условия контакта с формой

На поверхностях, не испытывавших гравитационное давление расплава, с уменьшением количества металла, пройденного через сечение полости формы, то есть проконтактировавшего с её поверхностью, наблюдается уменьшение шероховатости отливки. Например, в начале литниковой системы количество металла, пройденное через сечение, равно $9,6 \text{ г/мм}^2$, среднее значение шероховатости поверхности Ra равно $3,46 \text{ мкм}$, а в прибыли, через которое прошло минимальное количество металла – $0,3 \text{ г/мм}^2$, шероховатость равна $1,34 \text{ мкм}$. Наглядно это представлено на рисунке 44.

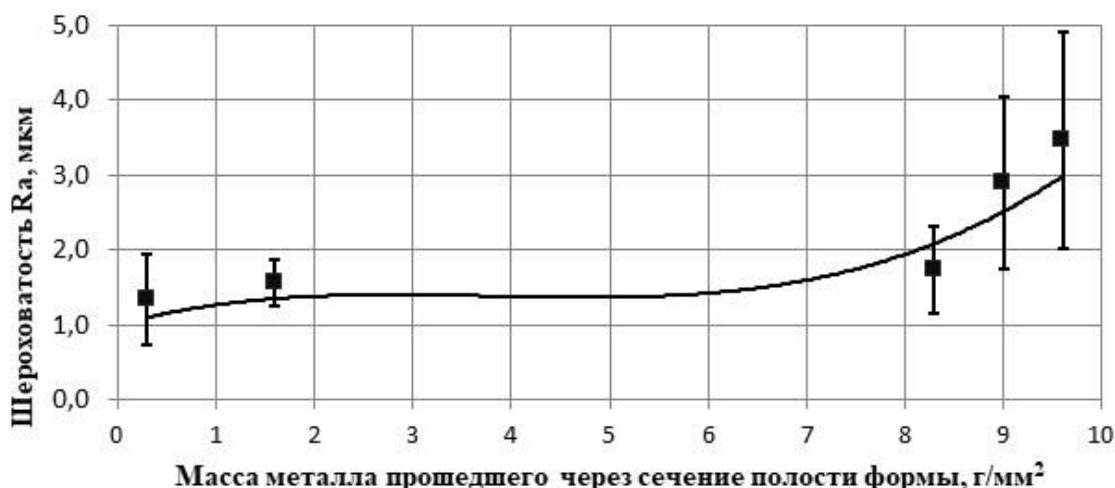


Рисунок 44 – Зависимость шероховатости поверхности отливки от количества металла, шедшего через сечение полости формы

В результате анализа полученных результатов была выведена формула для расчета шероховатости поверхности отливки в зависимости от количества металла, прошедшего через сечение отливки:

$$y = 0,01x^3 - 0,1x^2 + 0,36x + 1 \quad (3)$$

где y – значение шероховатости поверхности Ra , мкм;

x – масса металла, пройденного через сечение отливки, г/мм².

В процессе заполнения формы происходит теплообмен между расплавом и поверхностью формы. Графит обладает высокой теплопроводностью, благодаря чему температура расплава быстро снижается. В результате этого вязкость жидкого металла увеличивается, и снижается его жидкотекучесть. Поэтому, когда расплав заполняет последние участки формы, он менее активно взаимодействует с формой и хуже заполняет открытые поры и неровности. Это приводит к формированию на отливке более гладкой поверхности.

Влияние температуры расплава и его количества, проконтактировавшего с формой, на шероховатость поверхности формы, наглядно можно видеть на рисунке 45. Чем выше температура расплава и чем длительнее контакт металл–форма, тем грубее поверхность формы.

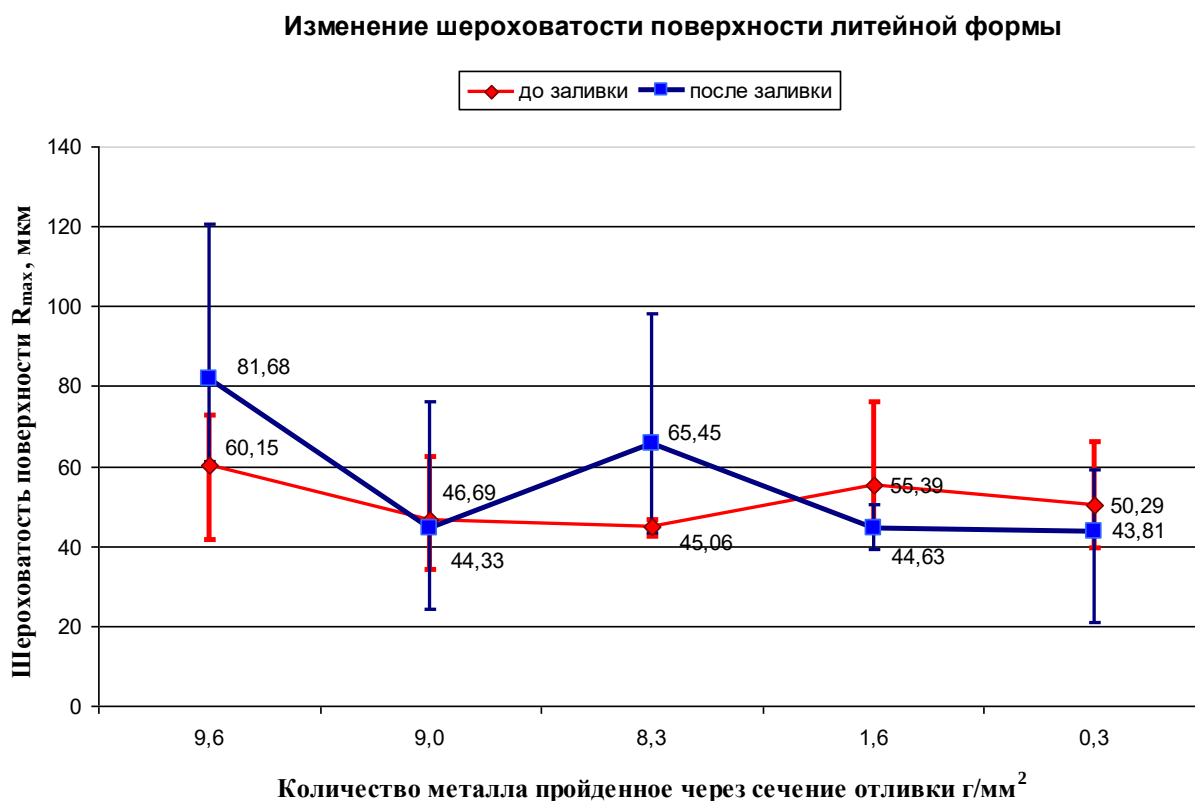
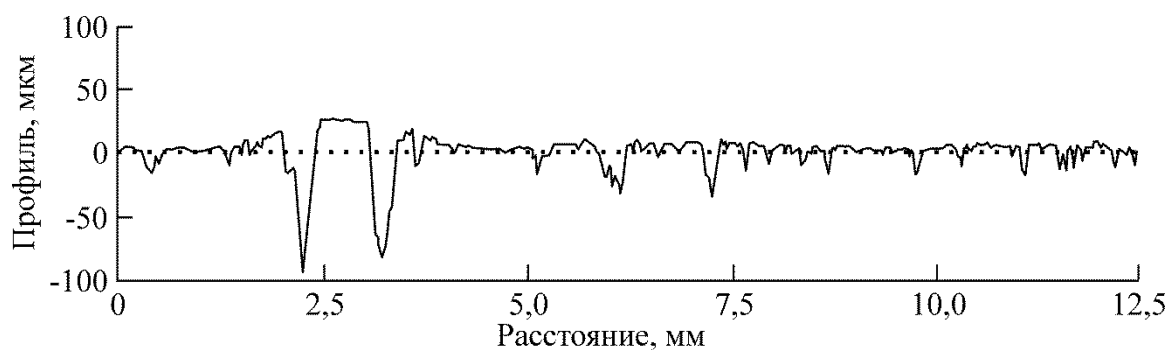


Рисунок 45 – Зависимость максимального отклонения микропрофиля поверхности литейной формы от количества металла, пройденного через сечение

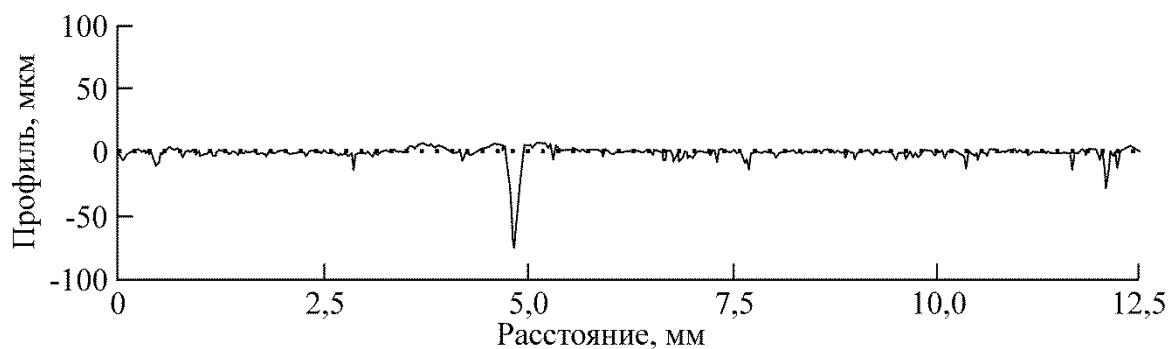
Следует отметить, что точке $9,0 \text{ г/мм}^2$ на рисунке 34 соответствует вертикальный участок литниковой системы, давление на стенки формы на этом участке минимальное, поэтому её шероховатость практически не изменилась.

На поверхности формы после взаимодействия с металлом образуются оксиды алюминия, титана и других металлов [106]. С уменьшением количества металла, проходящего через сечение полости формы, эрозионное

действие расплава снижается, и поры на поверхности формы заполняются адсорбированными оксидами, а пики неровностей на поверхности графита сгорают. Это приводит к уменьшению величины $R_{\max}$ и выравниванию профиля поверхности (см. рисунок 46).



а)



б)

Рисунок 46 – Профиль поверхности образца из графита марки ГМЗ.

а) до заливки; б) после заливки

Изучение поверхности графита после контакта с расплавом позволяет сделать вывод о том, что элементы формы, которые извлекаются без разрушения, можно использовать повторно, что приводит к снижению сроков изготовления литейной формы.

4.3 Анализ поверхности графитовой формы после заливки

В данной работе в процессе исследования взаимодействия на границе раздела расплав (сплав ВТ20Л) – форма на сканирующем электронном микроскопе проводился анализ образцов, вырезанных из формы после заливки в нее металла. Снимок поверхности образца №1, взятого из стержня формы «Стойка», из графита марки ГМЗ, представлен на рисунке 47. Образец имеет форму параллелепипеда. Одна из сторон является поверхностью соприкосновения металла и формы. В этом месте происходит интенсивное взаимодействие при нагреве и гидравлическом давлении со стороны расплава.

Во вторичных электронах на рисунке 47 (а) показан рельеф поверхности образца в месте контакта металл-форма. Значительного разрушения и размывания материала формы не произошло.

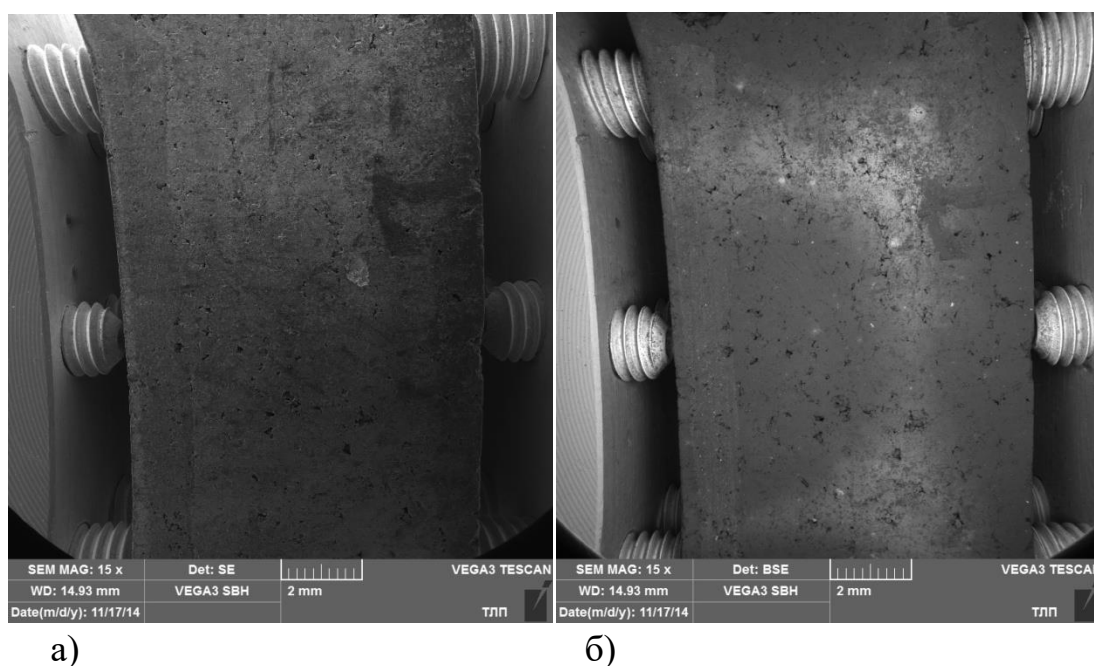


Рисунок 47 – Изображение поверхности графитового образца №1 во вторичных электронах (а), в отраженных электронах (б)

Изображение, полученное с помощью детектора отраженных электронов в оптическом микроскопе, представленное на рисунке 47 (б), дает

нам данные о химическом составе поверхности графитовой формы после заливки металла и охлаждения. Изображение является черно–белым.

На рисунке 48 можно наблюдать светлые пятна на тёмном фоне графита. Они означают, что на поверхности графитовой формы в результате контакта металла с формой образовались химические элементы и соединения.

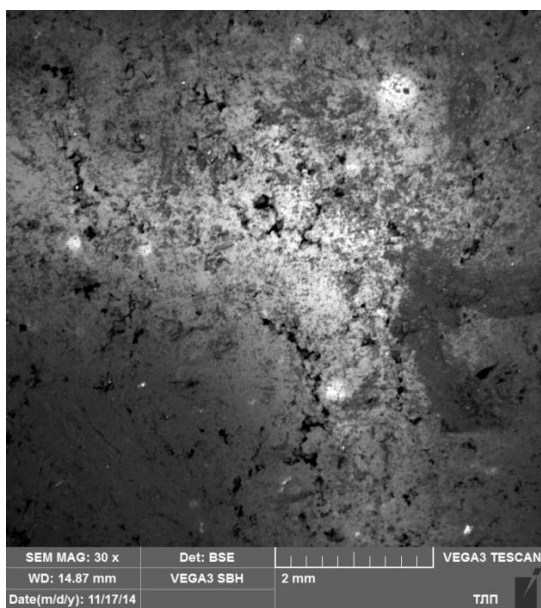


Рисунок 48 – Светлые области на поверхности образца №1

Рассмотрим более подробно светлые и темные области на образце. Анализ химического состава светлой части позволяет определить примерный состав элементов на поверхности. Используя литературные данные, можно предположить, какие соединения образуются, и причину их возникновения.

На фотографии (рисунок 49) светлые части изображены при увеличении в 500 крат.

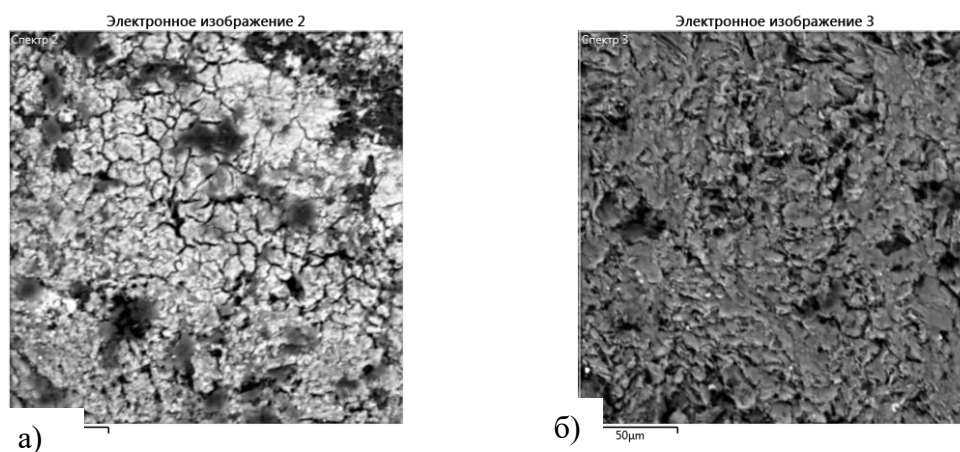


Рисунок 49 – Изображение поверхности графитового образца: а) более светлая область; б) более темная область

Химический состав светлой части приведен на рисунке 50 (а, б). Идентификация элементов производится по шкале энергии и интенсивности фотоэлектронных пиков. Как видно из графика, на поверхностном слое материала присутствуют такие элементы, как углерод (материал формы), алюминий, кислород.

В темной области образца содержание элементов на поверхностном слое формы существенно меньше. В основном это углерод, из которого состоит форма. А на поверхности незначительное количество алюминия, кислорода и титана. Это означает, что с этой областью по каким-то причинам металл имел более слабый контакт.

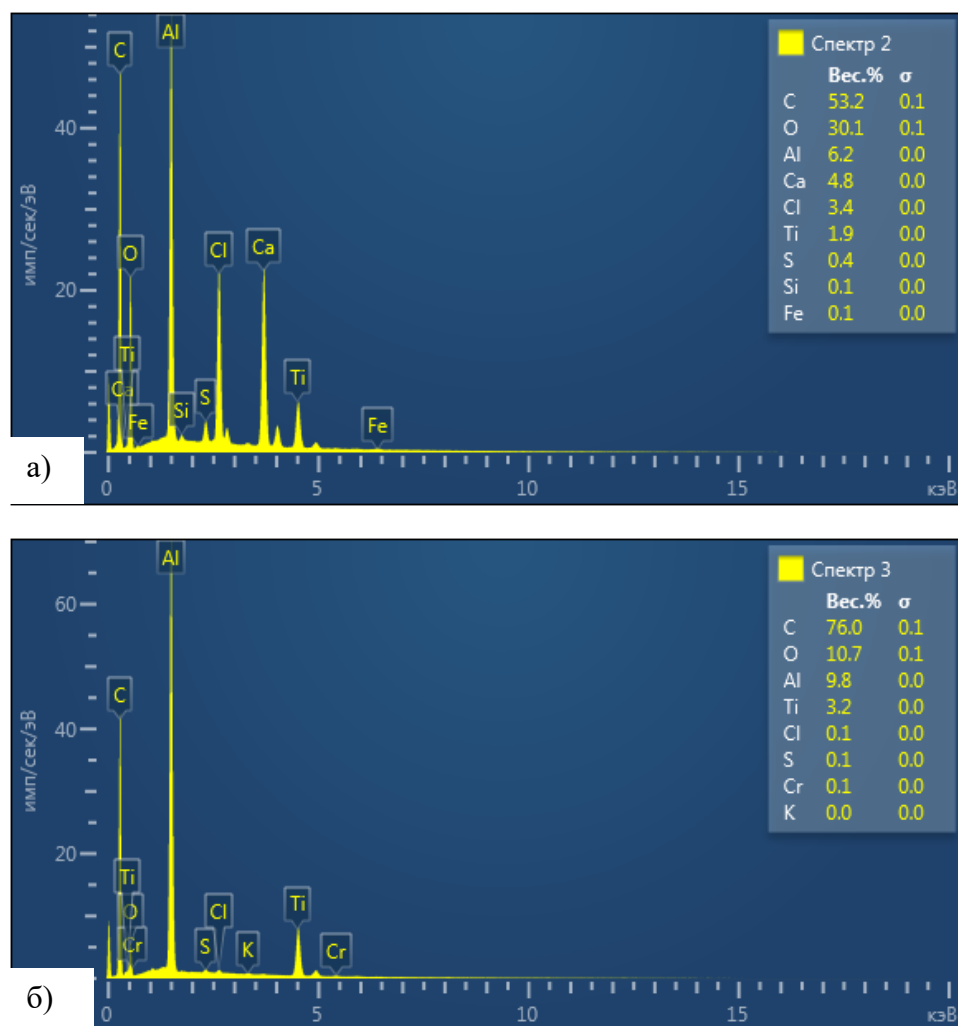


Рисунок 50 – Спектрограммы светлых пятен на поверхности образца: более светлой части образца (а), более темной части образца (б)

Рассмотрим образец, у которого одна из поверхностей не контактировала с металлом — это образец №2. Он изображен на рисунке 51 (а, б).

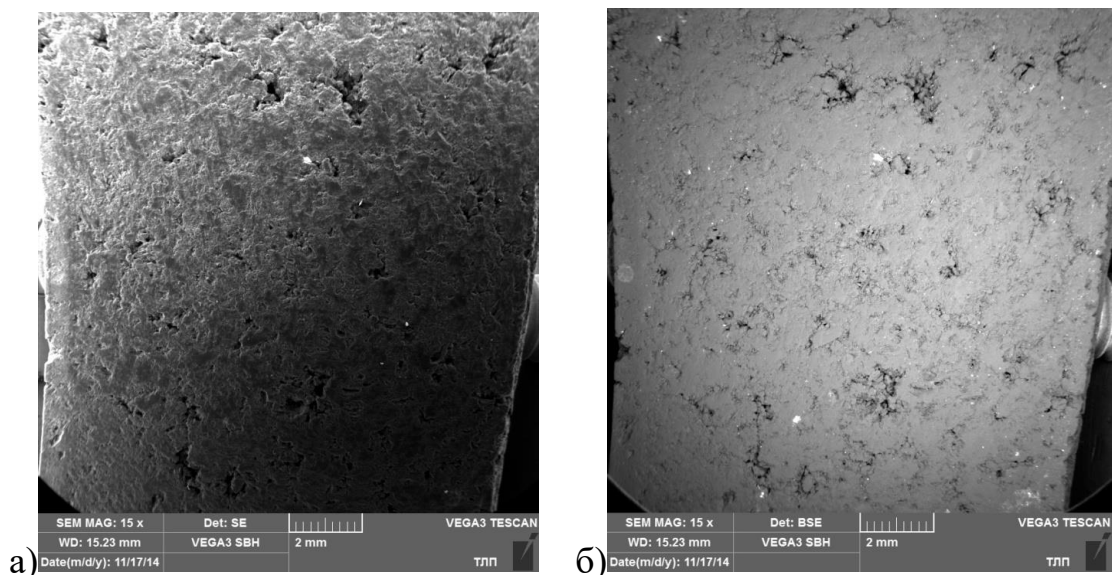


Рисунок 51– Изображение поверхности графитового образца №2 во вторичных электронах (а), в отраженных электронах (б)

На фотографии образца видно, что химические элементы равномерно распределены по поверхности образца. Изображение поверхности образца №2 представлено на рисунке 52.

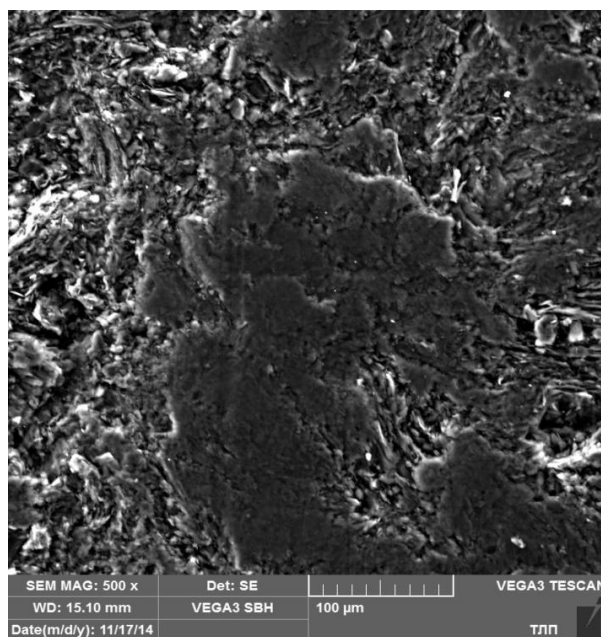


Рисунок 52– Изображение области поверхности образца №2

Следует отметить, что на образце материала формы, не контактировавшего с расплавом, на поверхности, кроме основного элемента углерода, образовался кислород в значительном количестве. Многие элементы, преобладавшие на поверхности контакта металл–форма, отсутствуют. Состав и содержание химических элементов области образца представлены на спектрограмме (рисунок 53).

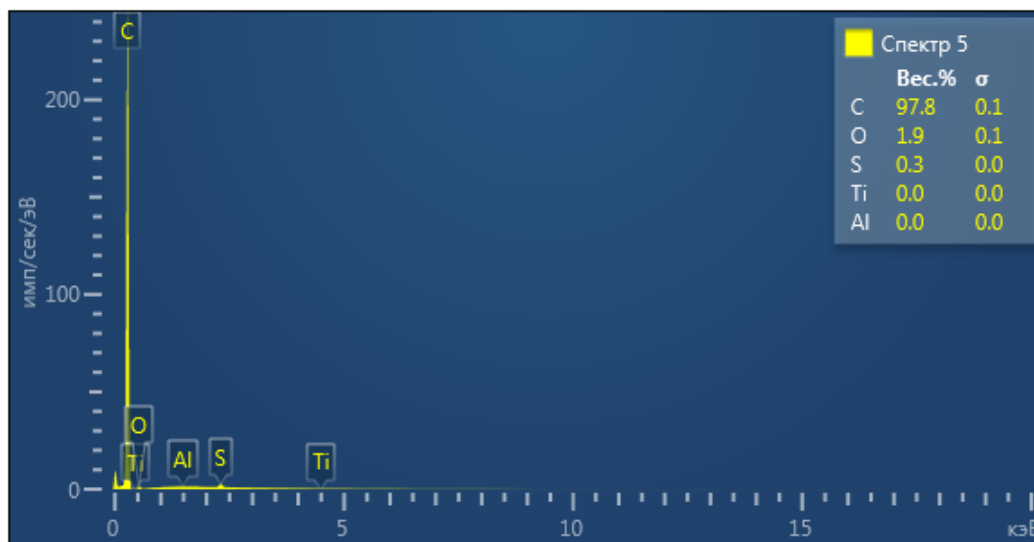


Рисунок 53 – Спектрограмма поверхности области образца, не контактировавшего с расплавом

Следовательно, их образование на этой поверхности в литейной форме вызвано непосредственно взаимодействием между собой химических элементов, входящих в состав титанового сплава, и материала форм на основе графита. В результате контакта происходит образование на поверхности соединений, содержащих кислород, алюминий, титан.

Для определения интенсивности распределения химических элементов на поверхности формы был проведен более подробный анализ образца №1 с помощью карты распределения элементов. На рисунке 54 представлена фотография изучаемой области (54, а) и химический состав поверхности (54, б)

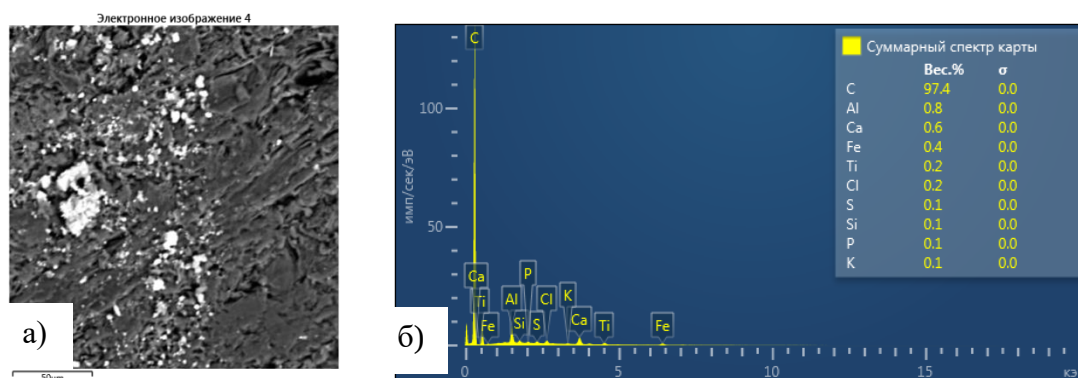


Рисунок 54 – Изображение поверхности области образца №1 (а),
спектрограмма поверхности области образца №1 (б)

Распределение элементов по поверхности области образца №1
изображено на рисунках 55 и 56.

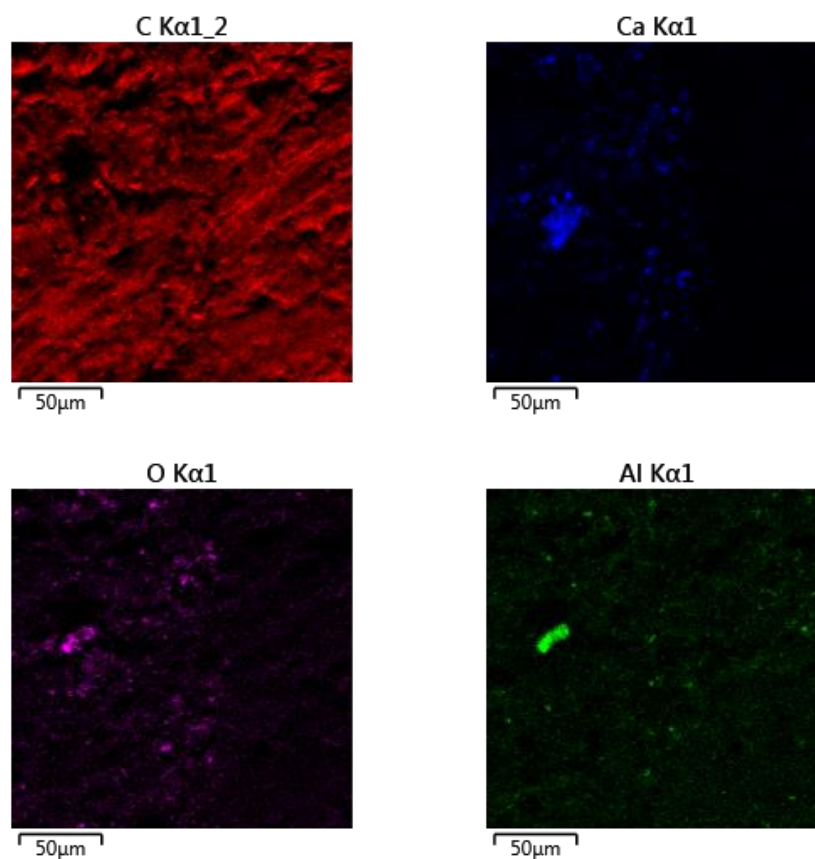


Рисунок 55– Карта распределения химических элементов по
поверхности образца №1

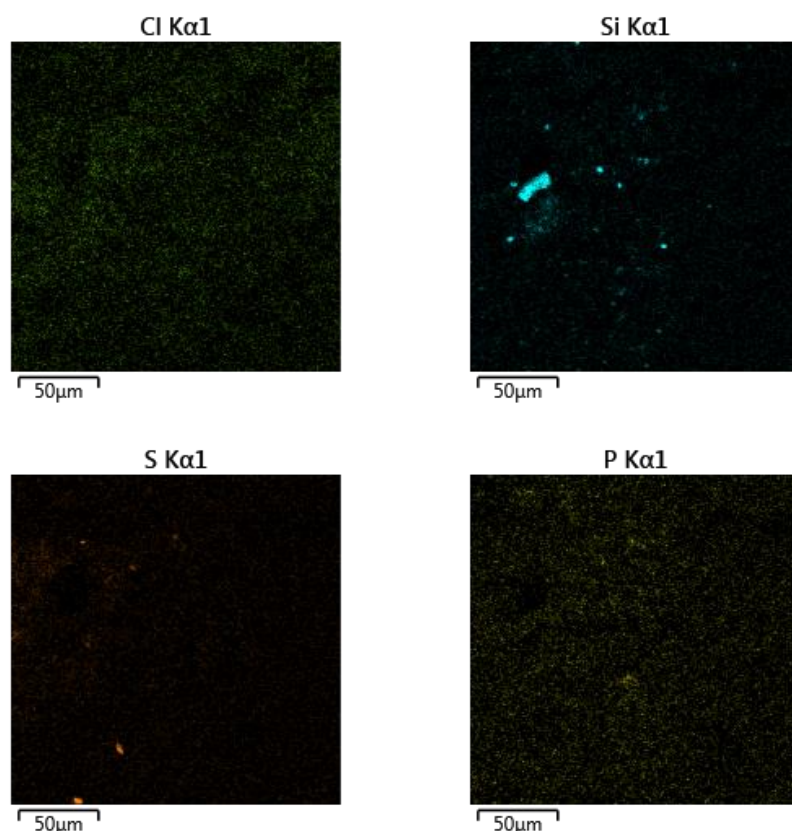
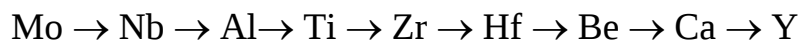


Рисунок 56 – Карта распределения химических элементов по поверхности образца №1

Из анализа этих изображений следует, что элементы, образовавшиеся на поверхности формы, в целом распределены по поверхности образца равномерно, несмотря на наличие локальных скоплений элементов (наиболее яркие пятна на изображениях).

На поверхности контакта металл–форма образуются оксиды, такие как Al_2O_3 , Al_2O , TiO , CaO .

Металлы по возрастанию устойчивости оксидов образуют ряд:



Среди компонентов сплава и материала формы наиболее устойчивый оксид имеет Ti, поэтому именно этот металл будет в первую очередь определять взаимодействие сплава с оксидами по реакции:



Механизмы появления химических соединений на поверхности материала формы могут быть различны:

- Угар элементов во время плавки. Так как плавка производится в вакууме, и форма помещается внутрь печи, то возможна адсорбция на поверхности формы. Также возможно механическое «прилипание» угоревших химических элементов расплава за счет вакуумного всасывания, так как вакуумные насосы располагаются в печи в области контейнера с формой.

- Возможность внесения частиц вместе с заливаемым в форму расплавом: неустойчивость Al_2O_3 и CaO связана с восстановлением этих оксидов титаном и переходом в газовую фазу паров металлического кальция или газообразного оксида алюминия.

- Вскипы и выделение в газовую фазу легкоплавких и малых по плотности элементов, входящих в состав сплава и графита.

- другие механизмы.

4.4 Структура сплава в опытных отливках

В полученных отливках «Стойка» (а) и «Втулка» (б) исследовали структуру сплава ВТ20Л в литом состоянии, её изображение представлено на рисунке 57.

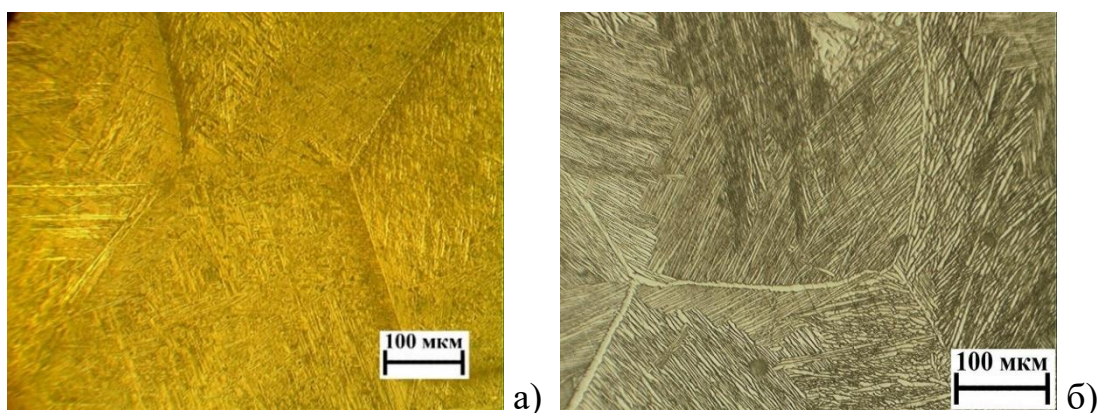


Рисунок 57 – Микроструктура сплава ВТ20Л в отливках

а) «Стойка», б) «Втулка»

4.5 Результаты экспериментов по изучению взаимодействия титановой отливки с материалом формы

Анализ химического состава сплава в отливке «Втулка» (таблица 14) показал, что сплав, из которого изготовлена отливка, по всем элементам соответствует требованиям ТУ 1–92–184–91.

Таблица 14 – Марочный (ТУ 1–92–184–91) и фактический химический состав сплава ВТ20Л в отливке «Втулка».

ВТ20Л	Основные компоненты, % масс.					Примеси, не более, % масс.						
	Ti	Al	Mo	V	Zr	Si	C	Fe	Si	O	N	H
ТУ 1–92–184–91	основа	5,5–6,8	0,5–2,0	0,8–1,8	1,5–2,5	0,15	0,13	0,30	0,15	0,16	0,05	0,01
Фактический хим. состав	основа	5,0	1,09	1,72	1,88	0,03	0,03	0,05	0,03	0,15	0,03	0,01

В результате анализа микроструктуры образцов, которые представлены на рисунке 59, не было обнаружено изменений в структуре сплава по границам поверхностей всех образцов (отсутствуют «игольчатые» зерна). Это свидетельствует об отсутствии альфированного слоя на поверхности отливок вне зависимости от количества металла, прошедшего через сечение полости формы и величины шероховатости её поверхности. Обусловлено это, вероятно, тем, что графит обладает высокой теплопроводностью, а титановый сплав, ввиду особенностей плавки, мало перегрет (на 50–70 °С выше температуры ликвидуса). В результате этого расплав быстро образует твердый слой на границе металл–форма, который потом не размывается потоком металла.

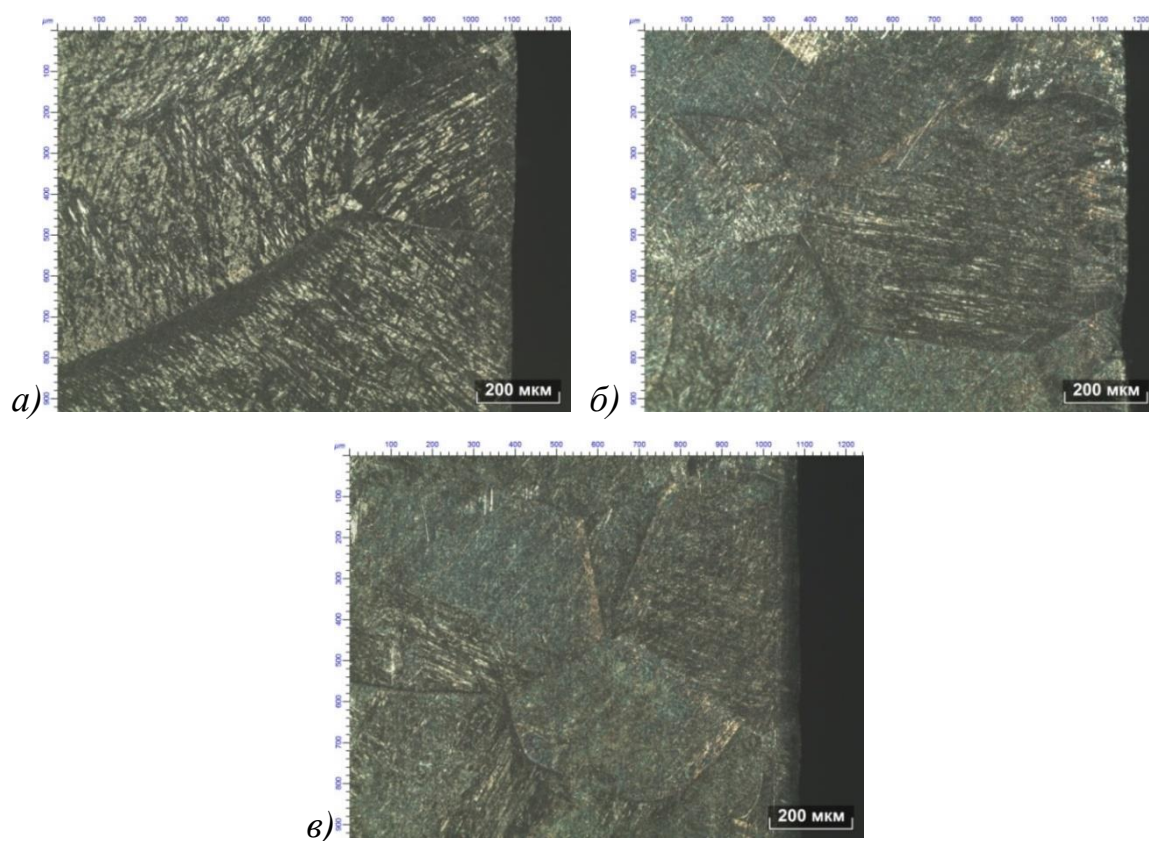


Рисунок 59 – Микроструктура образцов из сплава ВТ20Л, вырезанных из отливки «Втулка»: (а) участок А, (б) участок Б, (в) участок В.

Оптическая микроскопия

Это явление можно наблюдать в результатах моделирования. На рисунке 60 показан разрез формы в процессе заполнения её расплавом, спустя 14 секунд с начала заливки. Серым цветом внутри полости формы обозначена твердая фаза, как видно, она располагается на поверхности и тонких стенках отливки. Образовавшаяся корка твердой фазы создает «рукав», внутри которого течет расплав.

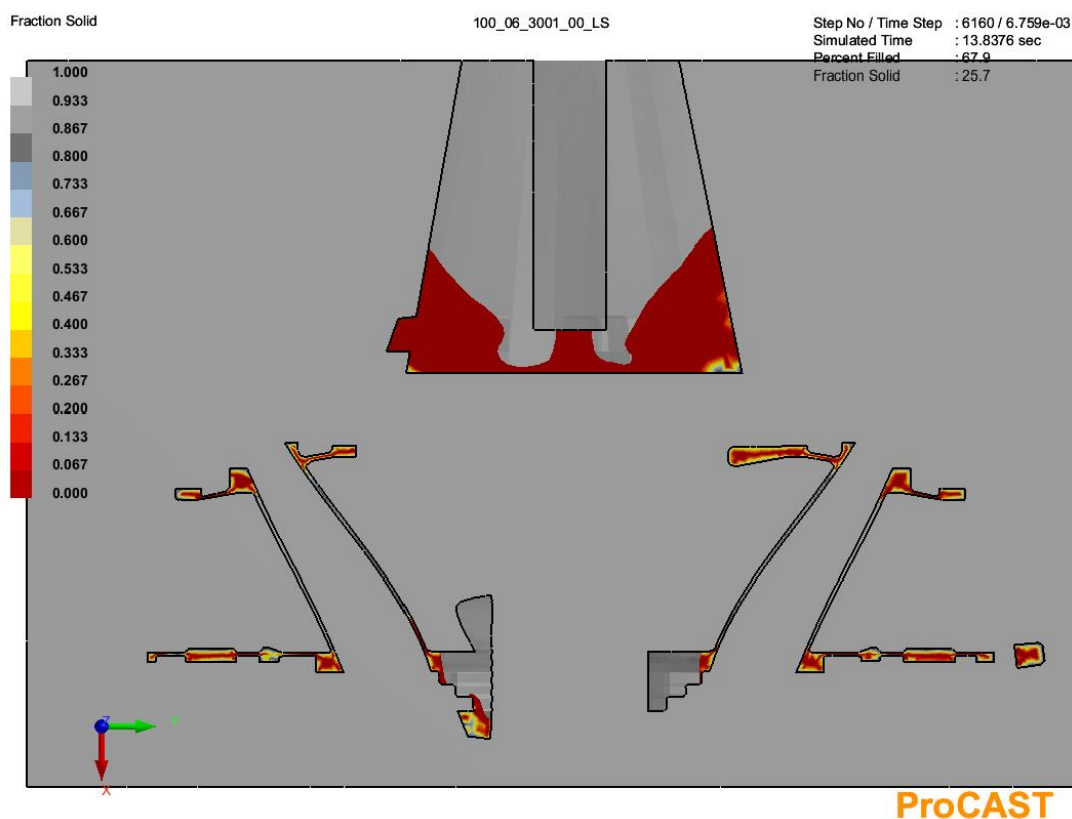


Рисунок 60 – Распределение твердой фазы в отливке «Втулка» спустя 14 секунд с начала заливки

Спустя 25 секунд с момента заливки расплав полностью заполнил полость формы (рисунок 61). Форма к этому времени разогрелась в некоторых местах до 1000 °С, как видно на рисунке 62, однако, за счет высокой теплопроводности графита, температура формы в этих местах спустя 7 секунд снижается уже до 900 °С (рисунок 63), а спустя еще 397 секунд температура формы в самых горячих местах составляет уже 500 °С (рисунок 64).

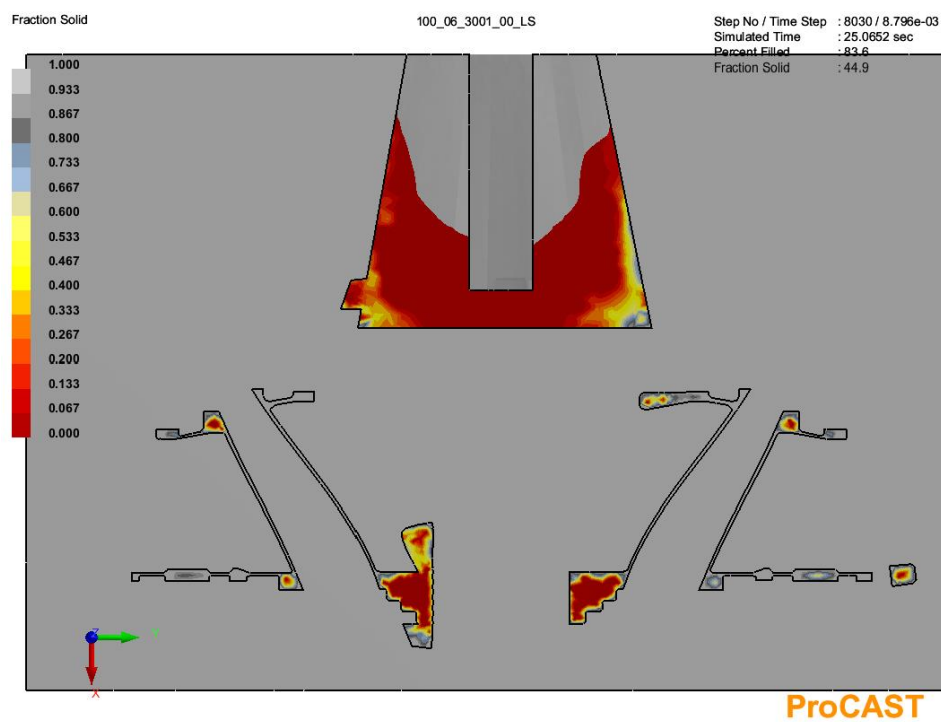


Рисунок 61 – Распределение твердой фазы в отливке «Втулка» спустя 25 секунд с начала заливки

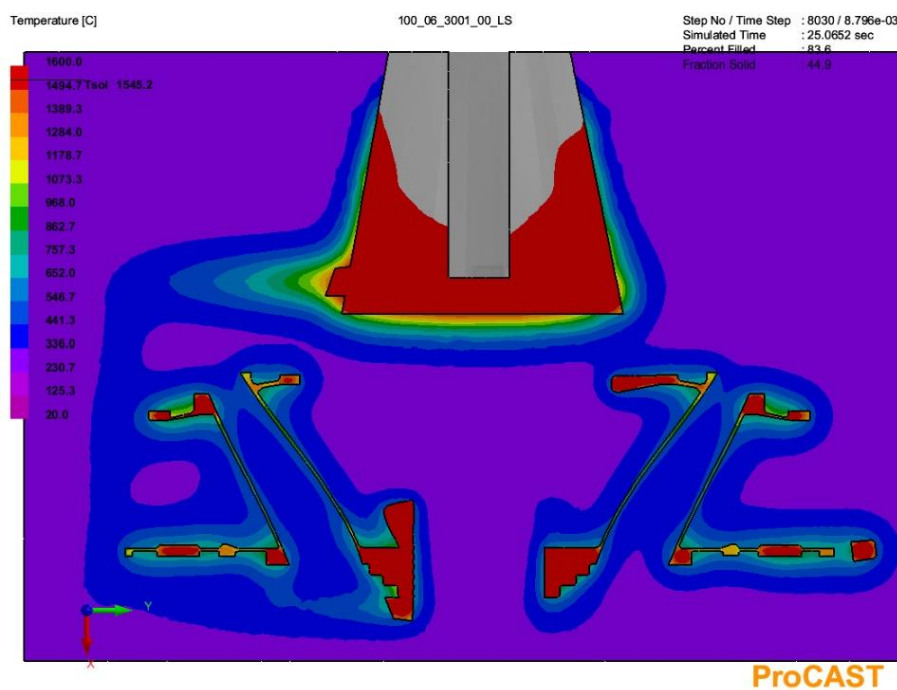


Рисунок 62 – Температурные поля в отливке и форме «Втулка» спустя 25 секунд с начала заливки



Рисунок 63 – Температурные поля в отливке и форме «Втулка» спустя 32 секунды с начала заливки.

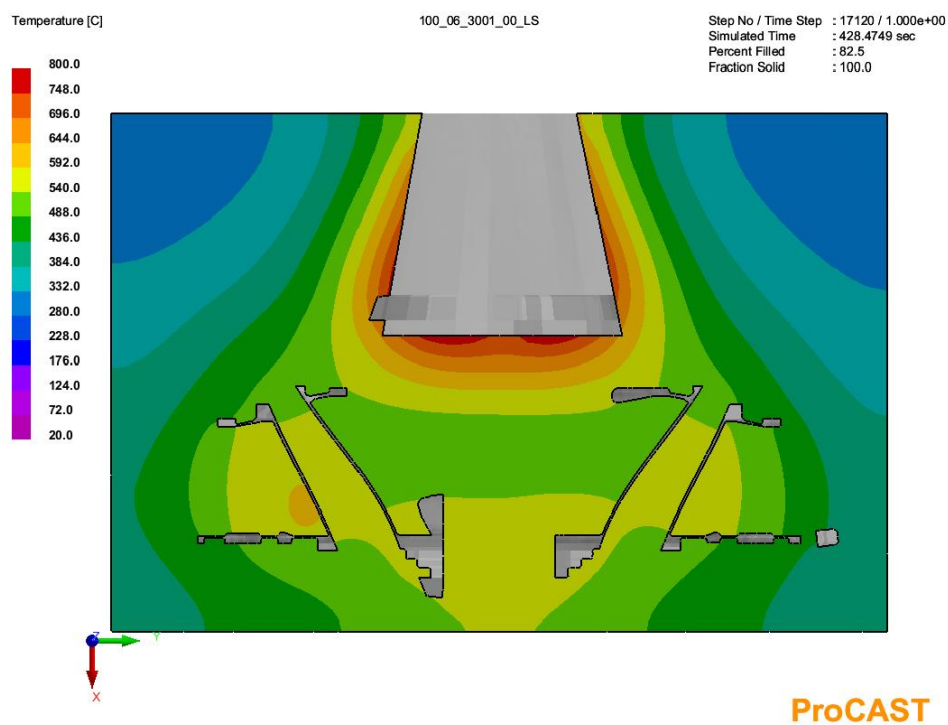


Рисунок 64– Температурные поля в отливке и форме «Втулка» спустя 429 секунд с начала заливки.

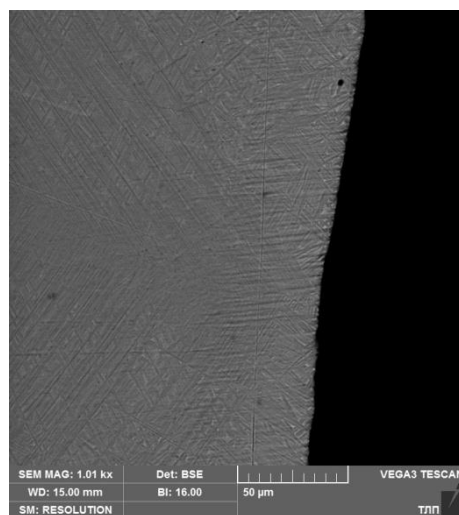
Из-за высокой скорости охлаждения металла и применения в качестве материала формы графита высокой чистоты, содержание зол у которого не более 0,03 % масс., альфированный слой не образовывается.

Изменение шероховатости поверхности отливки с уменьшением количества металла, прошедшего через сечение полости формы, происходит, вероятнее всего, из-за снижения жидкотекучести сплава по причине его охлаждения в процессе заполнения формы. Расплав хуже воспроизводит рельеф ее поверхности, вследствие чего на отливке формируется более гладкая поверхность.

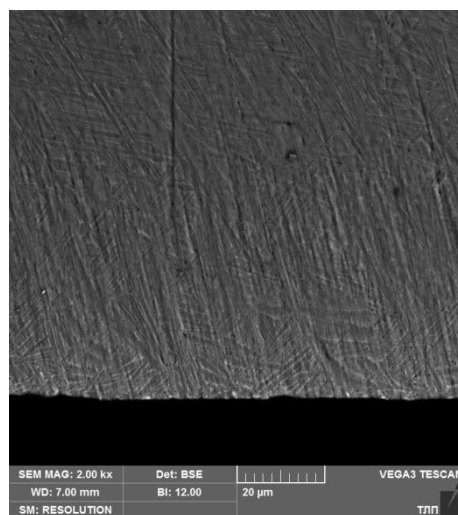
Полученные результаты согласуются с анализом, проведенном на сканирующем электронном микроскопе (рисунок 65). Изображения микроструктуры на границе образца аналогичны микроструктуре в объеме, что свидетельствует об однородном фазовом составе, а это значит, что альфированный слой на поверхности образца отсутствует.

Микрорентгеноспектральный анализ поверхностного слоя образцов показал отсутствие насыщения поверхности кислородом и углеродом, они распределены равномерно в поверхностном слое отливки (рисунок 66).

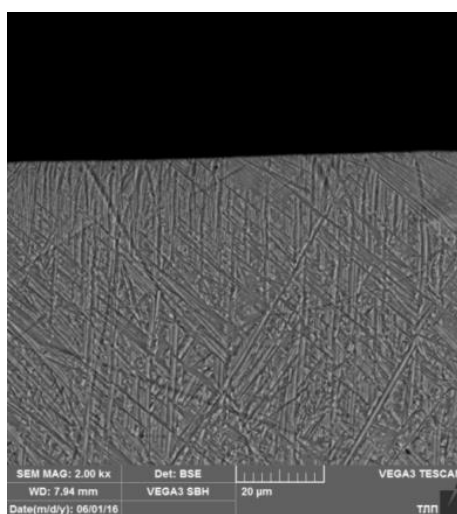
Это означает, что взаимодействие расплава с кислородом, адсорбировавшимся на поверхности формы, было настолько мало, что не оказало влияния на химический состав и структуру поверхностного слоя отливки. А распределение углерода свидетельствует о том, что при затвердевании расплава не было активного взаимодействия с материалом формы, наблюдается лишь незначительное повышение фона у поверхности (до 20 мкм).



a)



б)



в)

Рисунок 65 – Микроструктура образцов из сплава ВТ20Л, вырезанных из отливки «Втулка»: *(a)* участок А, *(б)* участок Б, *(в)* участок В. Сканирующая электронная микроскопия

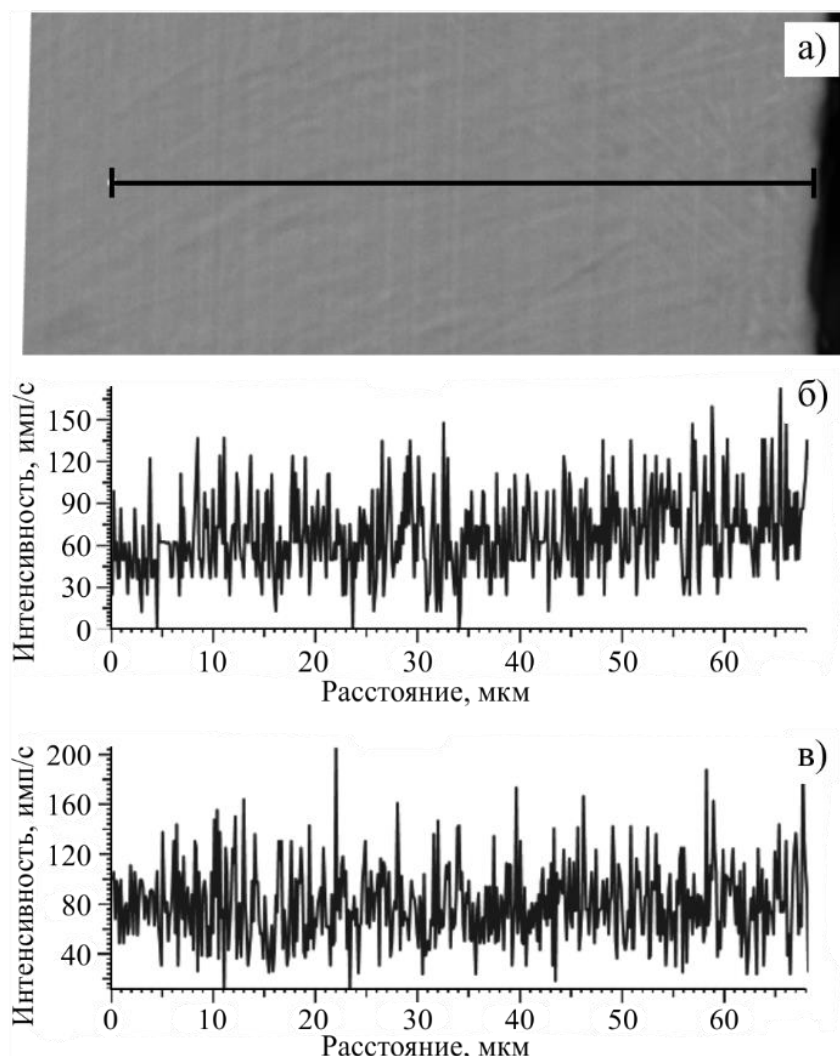


Рисунок 66 – Микроструктура края образца участка А (а) и профили распределения углерода (б) и кислорода (в) в поверхностном слое

Для подтверждения результатов были проведены испытания микротвердости образца, вырезанного из отливки «Стойка». Нагрузка составляла 0,981 Н (100 кгс). Результаты представлены на рисунке 58.

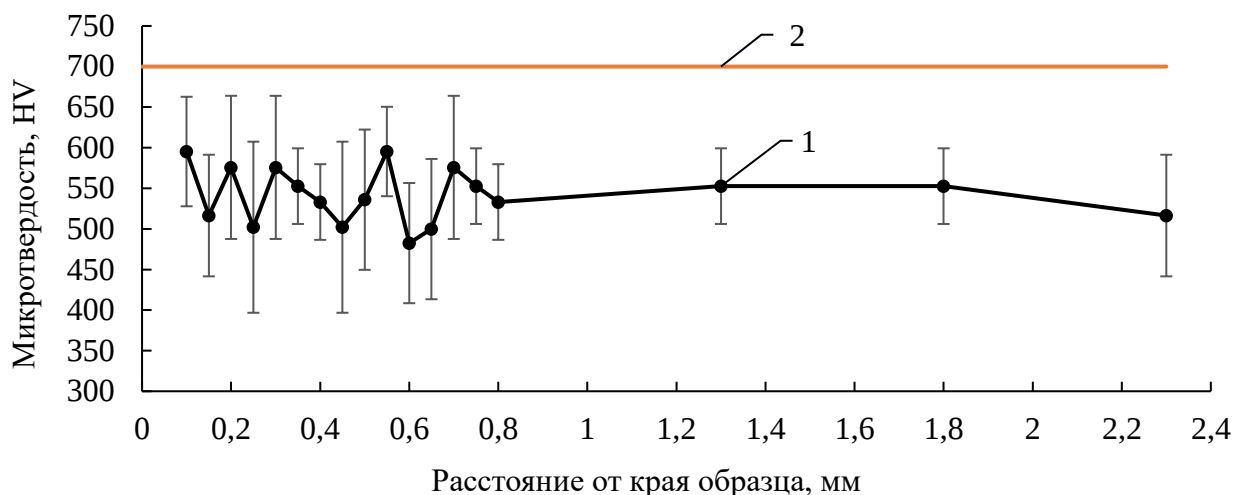


Рисунок 58 – Результаты измерения микротвердости от края образца:

- 1) средние значения измерения микротвердости; 2) микротвердость альфированного слоя

Значения микротвердости постоянны и не превышают предела 700 HV, который присущ альфированному слою.

Полученные механические свойства сравнили с экспериментальными и литературными данными для других способов литья (таблица 15).

В результате было установлено, что сплав в отливках, полученных по безмодельной технологии, обладает высокой прочностью, превосходящей это свойство сплава в отливках, изготавливаемых другими способами литья, а также имеет ударную вязкость несколько выше, чем в отливках, полученных методом литья по выплавляемым моделям в графитовые формы. Высокий уровень механических свойств сплава ВТ20Л в отливках, полученных по безмодельной технологии, во многом обусловлен качественной поверхностью и высокой инертностью формы, более мелким зерном за счет высокой скорости охлаждения, отсутствием в отливке загрязнений частицами графита и продуктами взаимодействия с формой и, как следствие, отсутствием в сплаве концентраторов напряжений.

Таблица 15 – Механические свойства сплава ВТ20Л в отливках, полученных различными способами литья.

Способ литья	Предел прочности, σ_b , МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение δ , %	Ударная вязкость, КСУ, Дж/см ²
В соответствии с ОСТ 1 90060–92	882,6 ... 1128,8	785	5,0	28
Безмодельная технология (данная работа)	1043,4	863	9,1	48
По выплавляемым моделям в формы из графитового порошка	969,9	814	8,4	84
В уплотняемые формы	882,6	794	5,0	30
Литье по выплавляемым моделям	1000,0	890	8,0	–
В зависимости от количества примесей $\Sigma(O_2+N_2)$	850,2– 919,9	780–830	8,0–12,0	32–38

5. Результаты определения размерной точности опытных отливок

Для определения размерной точности, которую позволяет получать метод литья по безмодельной технологии, был проведен контроль геометрии отливок «Втулка» и «Стойка». Основной задачей такого контроля является раннее выявление отклонений формируемой поверхности от теоретической, которое позволит скорректировать технологические режимы для получения годной отливки.

В первую очередь решено было изготавливать опытную отливку «Стойка», так как она обладает меньшими габаритами и более простой формой. При проектировании технологии литья была заложена линейная усадка 1,2%. Это верхняя граница значений усадки литейных титановых сплавов (0,85—1,2%) [72]. Результат анализа по определению размерной точности отливки «Стойка» представлен на рисунке 67. Наблюдается отклонение вертикальных размеров отливки от номинальных в сторону превышения, но в целом эти отклонения составляют не более 1 мм.

После изучения полученных данных была скорректирована технология для отливки «Втулка». Для ее изготовления заложили величину усадки 0,7%. Следует отметить, что габаритные размеры отливки «Втулка» значительно превышают размеры отливки «Стойка», и она значительно сложнее, поэтому дальнейший анализ точности изготовления производили для этой отливки. Результаты определения точности полученной отливки «Втулка» представлены на рисунке 68.

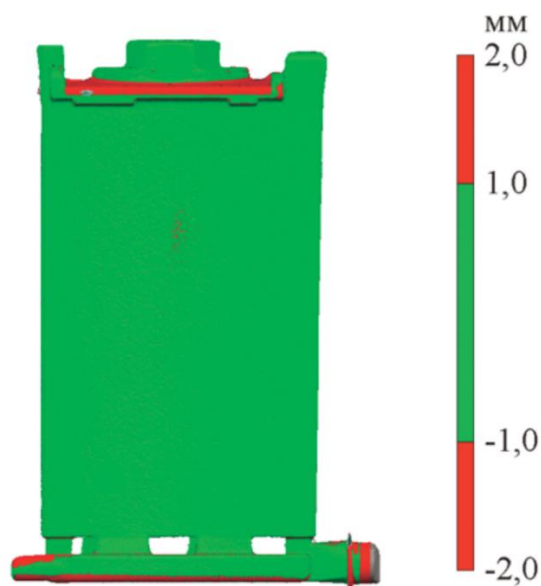


Рисунок 67 – Отклонения размеров отливки «Стойки»
(отклонения допуска показаны красным)

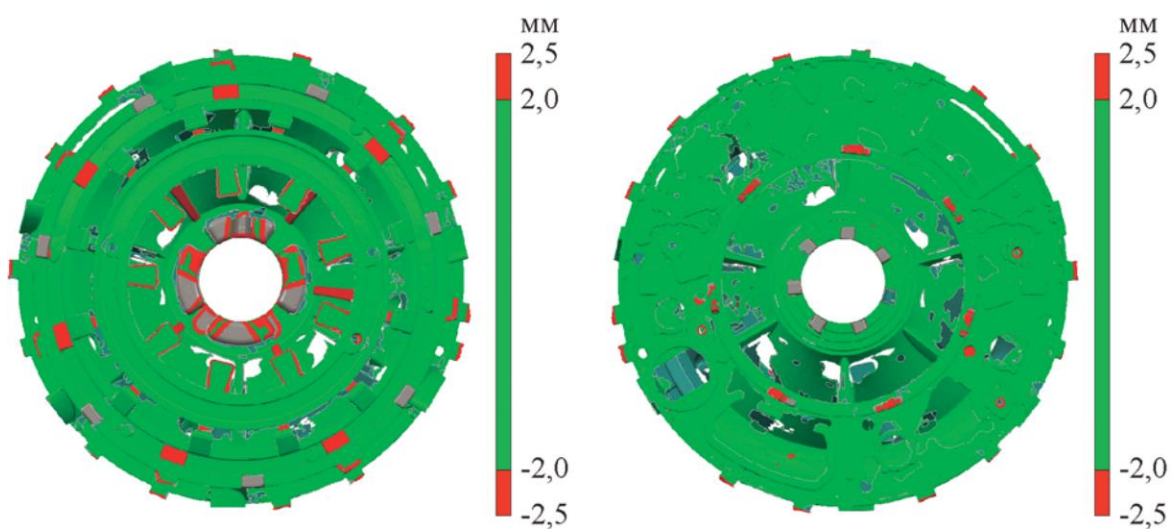


Рисунок 68 – Отклонения размеров отливки «Втулка»
(отклонения допуска показаны красным)

Несмотря на большие (более метра) габариты, отклонения размеров от номинальных в отливке не превышают 2 мм. Отклонения присутствуют лишь в прибыльной части, за счет изменения их конструкции в процессе

изготовления. Для определения фактической линейной усадки сплава ВТ20Л при изготовлении отливок по безмодельной технологии в графитовые формы, в отливке «Втулка» определили базовые размеры А—G (рисунок 69) в вертикальном и горизонтальном сечении. По их отклонению от номинальных размеров определяли величину усадки.

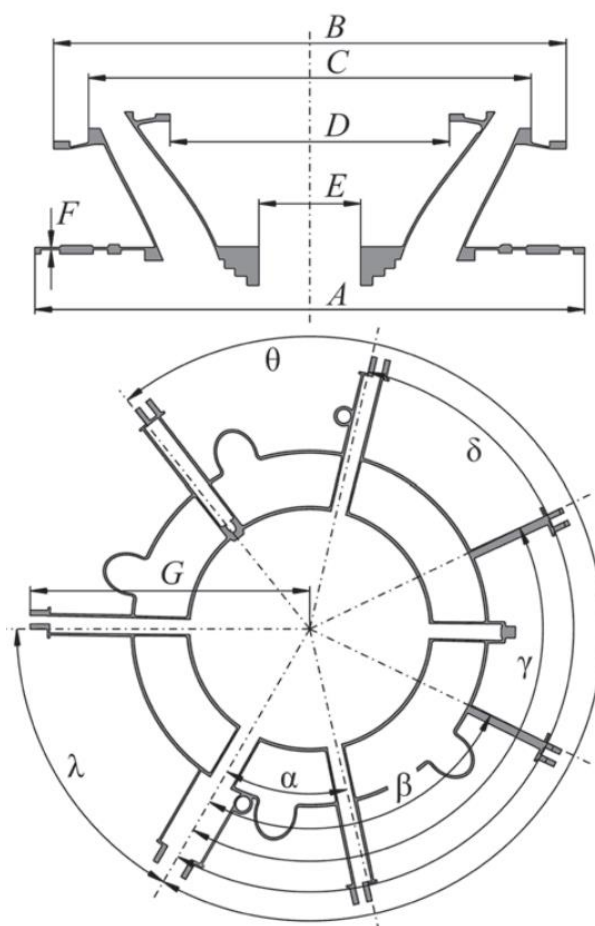


Рисунок 69 – Сечения модели отливки «Втулка» с размерами, которые измеряли в отливке

Часть размеров (А, В, С) имели свободную усадку, а часть затруднённую, за счет полнотелого стержня. Размеры в отливке, модели, форме, отклонения размеров и величина усадки представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Сравнение размеров модели и отливки «Втулка» и определение величины усадки сплава.

Обозначение размера	Размер в модели, мм	Размер в форме, мм	Размер в отливке, мм	Отклонение, мм	Величина усадки, %
A	D1160	D1168,1	D1160,9	0,9	0,62
B	D1082	D1089,6	D1080,07	1,3	0,82
C	D934	D940,5	D932,5	1,5	0,86
D	D590	D594,1	D592,0	2,0	0,35
E	D215	D217,5	D217,5	2,5	0
F	4,5	4,5	4,05	0,45	–
G	590	594,1	589,5	0,5	0,78

Величина свободной усадки для размеров A, B, C составила 0,62–0,86%, а там, где усадка была затруднена - 0–0,35% (для размеров D, E) за счет высокой твердости графитовых блоков, из которых была изготовлена форма. Поэтому при разработке технологии изготовления титановых отливок по безмодельной технологии в графитовые формы необходимо учитывать малую усадку на внутренних размерах, формируемых цельным стержнем, либо применять податливые стержни из других материалов, разрезные и др., которые смогут обеспечить свободную усадку и избежать образования горячих трещин. В качестве других материалов можно использовать графиты марки ПГ-50 и МНГ, так как они обладают гораздо более низкими прочностными характеристиками (таблица 17). Эти графиты содержат в своем составе большее количество примесей (зола) по сравнению с графитами ГМЗ и ГЭ, однако они не должны оказать влияние на поверхностный слой отливки, так как в данной работе определили, что взаимодействие титанового расплава с формой из графита отсутствует, преимущественно за счет высокой скорости охлаждения и невысокого перегрева расплава перед заливкой.

Таблица 17 – Свойства графитов марки ПГ-50 и МНГ по ТУ 1915–086–00200851–2007.

Физико–механические характеристики	Значение параметра	
	Графита ПГ-50	Графита МНГ
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	7,8	14,7
Предел прочности при изгибе, МПа, не менее	3,9	5,8
Зольность, %	0,6	1
Плотность, кг/м ³	950	1450
Пористость до, %	60	32

Размер F обозначает толщину фланца опытной отливки «Втулка». Его определяли как разницу между построенными плоскостями на вершинах участка модели, которые находятся на верхней и нижней поверхности фланца. Среднее значение толщины стенки фланца по пяти измерениям составило 4,05 мм, а отклонение при этом составило 0,45 мм, что, вероятно, связано не с усадкой сплава, а с уменьшением расстояния между частями формы, оформляющими этот фланец, из-за смещения стержней при сборке.

Размер G на рисунке 25 — это расстояния между центральной осью отливки и местами для приварки отливок «Стойка». В отливке «Втулка» таких мест семь. Для определения этих размеров строили центральную ось отливки, используя цилиндрическую поверхность (E), и проводили замер величины G между этой осью и плоскостями для приварки. В таблице 16 представлено среднее значение этого размера для семи мест приварки отливок «Стойка». Среднее отклонение размера от математической модели составило 0,5 мм, а величина усадки 0,78%.

Углы между полками для приварки стоек в математической модели и в отливке представлены в таблице 18. Отклонения углов составили от 1 до 19 угловых минут. В связи с тем, что литейная форма изготавливалась из восьмидесяти графитовых элементов, то такие незначительные отклонения углов говорят о том, что сборка графитовой формы в целом проведена с высокой точностью. Следовательно, можно уверенно предположить, что для более простых отливок, при гораздо меньшем числе частей формы, размерная точность может быть гораздо выше.

Таблица 18 – Углы между полками в модели и отливке «Втулка» и величина отклонения.

Угол между полками	Значение в модели, (°,')	Значение в отливке (°,')	Отклонение, (°,')
α	42°, 51'	42°, 59'	0°8'
β	94°, 17'	94°, 18'	0°1'
γ	145°, 42'	145°, 52'	0°10'
δ	197°, 8'	197°, 27'	0°19'
θ	248°, 34'	248°, 35'	0°1'
λ	60°	59°, 50'	0°10'

Следует отметить, что способ литья по выплавляемым моделям, альтернативой которому выступает рассматриваемый в данной работе способ литья по безмодельной технологии, позволяет изготавливать отливки с классом точности 6–10, но при этом наибольший габаритный размер отливки не должен превышать 630 мм. При шестом классе точности на номинальном размере 1000—1600 мм отклонение должно составлять 1,4 мм.

Общие выводы

1. Расширена база данных программы «ProCast» значениями коэффициента теплопередачи между сплавом BT20Л и блочным графитом марки ГМЗ, позволяющими с большей точностью рассчитывать параметры технологического процесса получения титановых отливок литьём в графитовые формы, за счет этого повышать выход годного литья и сокращать длительность процесса запуска в производство новой номенклатуры отливок.

2. Разработан и опробован в производственных условиях клеевой состав, содержащий 42 % графита, 32 % pulverбакелита и 26% спирта (% масс.), с помощью которого производилась сборка и ремонт элементов литейной формы, изготовленных из графита марки ГМЗ и ГЭ.

3. Безмодельная технология литья титановых сплавов в формы из графита позволяет получать отливки с высоким качеством поверхности. Шероховатость поверхности отливки (R_a) составляет 1,34...3,46 мкм, что полностью соответствует требованиям конструкторской документации, предъявляемым к литым титановым деталям. Выведена математическая формула (3), которая показывает зависимость значений шероховатости от количества металла, прошедшего через сечение полости литейной формы.

4. Установлено, что графитовые блоки марки ГМЗ и ГЭ, как материал литейной формы, обладают химической стойкостью по отношению к титановому расплаву за счет низкой зольности и высокой теплопроводности, которая обеспечивает интенсивный теплоотвод от поверхности отливки. Благодаря этому на её поверхности быстро образуется твердая корка, которая препятствует взаимодействию с материалом формы, и в результате альфированный слой, снижающий эксплуатационные свойства детали, не образуется.

5. При разработке технологии изготовления титановых отливок по безмодельной технологии в графитовые формы необходимо учитывать малую

линейную усадку на внутренних размерах (0–0,35%), формируемых цельным стержнем из графита ГМЗ, либо применять податливые стержни из других материалов, например, из графитов ПГ-50 и МНГ, либо разрезные и др., которые смогут обеспечить свободную усадку.

6. Изучение механических свойств сплава ВТ20Л, таких, как предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и предел вязкости в образцах, полученных с применением способа литья по безмодельной технологии, показало, что они соответствуют требованиям ОСТ 1 90060–92.

7. Установлено, что способ литья в графитовые формы (безмодельная технология) вследствие высокой размерной точности (6 класс ГОСТ Р 53464-2009), низкой шероховатости поверхности (R_a 1,34...3,46 мкм) и отсутствия на поверхности альфированного слоя может служить заменой классических способов, таких как литье по выплавляемым моделям и в набивные формы, для получения крупногабаритных, тонкостенных, сложной конфигурации титановых отливок.

8. Разработана и опробована в производственных условиях ПАО «ОДК-УМПО» технология изготовления тонкостенных (до 3,2 мм), крупногабаритных (более 1,0 м), ответственного назначения (авиационный двигатель) отливок "Стойка" и "Втулка" по безмодельной технологии в графитовые формы в поле центробежных сил (см. акт Приложение 2).

Список использованных источников

1. Двигатели НК-32-02 и будущее дальней авиации // Сетевое издание «Военное обозрение»: [сайт]. -2020. - URL: <https://topwar.ru> (дата обращения 6.11.2020);
2. Технология вакуумной плавки и литья: вакуумная плавка и производство фасонных отливок из титана и титановых сплавов: курс лекций / [В. Д. Белов и др.]. - Москва: МИСиС, 2013. - 106 с;
3. Шкленник Я. И., Озеров В.А. Литье по выплавляемым моделям. – М.: Машиностроение. 1984;
4. Горячее изостатическое прессование отливок из титановых сплавов / А. Г. Береснев, С. Ф. Маринин, И. М. Разумовский [и др.] // Литейное производство. – 2012. – № 7. – С. 20–24;
5. Cui Chunxiang, Hu BaoMin, Zhao Lichen. e.a. // Materials and Design. – 2011. – V. 32. – P. 1684–1691;
6. Dipankar Banerjee, J.C. Williams. Perspectives on Titanium Science and Technology // Acta Materialia. – 2012. – V. 61.– P. 844–879;
7. Gurrappa. Characterization of titanium alloy Ti–6Al–4V for chemical, marine and industrial applications // Materials Characterization. – 2003. – V. 51. – P. 131–139;
8. Ikuhiro Inagaki, Tsutomu Takechi, Yoshihisa Shirai. Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry // Nippon steel and sumitomo metal technical report. – 2014. – P. 22–27;
9. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. Б. Н. Арзамасов, И. И. Сидорин, Г. Ф. Косолапов и др.; Под общ. ред. Б. Н. Арзамасова.— 2-е изд., испр. и доп.— М.: Машиностроение, 1986. — 384 с;
10. Титановые сплавы в машиностроении / Б.Б. Чечулин, С.С. Ушков, И.Н. Разуваева, В.Н. Гольдфайн.— Ленинград: «Машиностроение», 1977.— 248 с;

11. C. Veiga, J.P. Davim, A.J.R. Loureiro. Properties and applications of titanium alloys: a brief review // Reviews on Advanced Materials Science. – 2012. – V. 32. – P. 133–148;
12. В.Д. Белов, А.В. Фадеев, А.И. Иващенко. Технология вакуумной плавки и литья: вакуумная плавка и производство фасонных отливок из титана и титановых сплавов. – М.: МИСиС. – 2013;
13. Филиппов, М. А. Методология выбора металлических сплавов и упрочняющих технологий в машиностроении : учебное пособие : в 2 т. : Т. 2: Цветные металлы и сплавы / М. А. Филиппов, В. Р. Бараз, М. А. Гервасьев; [науч. ред. С. В. Грачев]. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 236 с;
14. Управление структурой и свойствами по сечению полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6 методом термоводородной обработки : диссертация ... кандидата технических наук : 05.16.01 / Куделина Ирина Михайловна; [Место защиты: Рос. гос. технол. ун-т им. К.Э. Циолковского (МАТИ)]. - Москва, 2011. - 186 с;
15. Разработка ресурсосберегающей технологии получения крупногабаритных отливок из титановых сплавов / А.О. Деменок, А.А. Ганеев, О.Б. Деменок и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 20–25;
16. Бакерин С.В., Деменок О.Б. , Мухамадеев И.Р., Деменок А.О. Изготовление оболочковых форм для крупногабаритного прецизионного титанового литья // Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и термической обработки легких сплавов. Сборник докладов научно-технической конференции. Москва: Изд-во Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2016. С. 29;
17. Rui Neto , Teresa Duarte, Jorge Lino Alves , Francisco Torresa. Experimental characterization of ceramic shells for investment casting of reactive alloys // Portugal. Ciência & Tecnologia dos Materiais. № 29. 2017. P. 34–39;

18. Белов В. Д., Фадеев А. В., Павлинич С.П., Качалов А. Ю., Гамазина М.В., Аликин П.В. Влияние материала литейной формы на качество отливки из титановых сплавов // Литейщик России. - 2015. - №3. - 2015. - С.19-26;
19. Взаимодействие титанового расплава ВТ20Л с литейной формой при изготовлении крупногабаритных тонкостенных отливок авиационного назначения по безмодельной технологии: магистерская диссертация по направлению 22.04.02 – металлургия / Качалов Алексей Юрьевич // [Место защиты: НИТУ «МИСиС»].- Москва, 2015.- 69 с;
20. Графит конструкционный// ООО Торговый дом "Мосиндуктор": [сайт]. – 2015. - URL: <https://mosinductor.ru> (дата обращения 12.10.2015);
21. Капленко, И.В. Гурин, Т.С. Яковицкая О.Г. Чистота графитовых и углеродных композиционных материалов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2011. №2. С 132–136;
22. Лукина Н.Ф., Петрова А.П., Котова Е.В. Термостойкие клеи для изделий авиакосмической техники. // Труды ВИАМ. 2014. № 3. С. 6;
23. Петрова А.П., Лукина Н.Ф. Клеи для многоразовой космической системы // Труды ВИАМ. 2013. № 4. С. 4;
24. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Тюменева Т.Ю. Свойства клеев и клеящих материалов для изделий авиационной техники // Клеи. Герметики. Технологии. 2009. № 1. С. 14–24;
25. Петрова А.П. Термостойкие клеи. М.: Химия, 1977;
26. Андрианов Р.А., Пономарёв Ю.Е. Пенопласты на основе фенолформальдегидных полимеров. Ростов: Издательство Ростовского университета, 1987;
27. Николаев А.Ф. Технология пластических масс. Л.: Химия, 1977;
28. Лимонов Н.Ф., Глушанкова И.С., Фарберова Е.А., Зорина Е.И. Получение углеродных сорбентов из фенолформальдегидной смолы сферической грануляции // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10–15. – С. 3342–3346;

29. Haiyun Jiang, Jigang Wang, Shenqing Wu, Zhiqing Yuan, Zhongliang Hu, Ruomei Wu, Qilong Liu. The pyrolysis mechanism of phenol formaldehyde resin// Polymer Degradation and Stability. 2012. Vol. 97. P.1527–1533;
30. Wang C., Huang Y.D., Wang B. Study on heat-resistant property of adhesive/carbon-carbon composites joints // International Journal of Adhesion & Adhesives. 2006. Vol. 26. P. 206–211;
31. Жуковский С.С., Болдин А.Н., Яковлев А.И. и др. Технология литейного производства: формовочные и стержневые смеси. Учебное пособие для ВУЗов. Брянск: Изд-во БГТУ, 2002;
32. Renu Dhunna, Rita Khanna, Irshad Mansuri, Veena Sahajwalla. Recycling Waste Bakelite as an Alternative Carbon Resource for Ironmaking Applications. ISIJ International. 2014. Volume 54. Issue 3. P. 613–619;
33. Шелгаев В.Н., Миндлин Я.И., Басов А.А., Белякова Н.Б., Ямщикова Г.А., Демидова Г.Г. Изучение карбонизации модифицированных фенолформальдегидных смол // Научно-технический сборник. Вопросы авиационной науки и техники. Вып. 4, М.: ВИАМ, 1985. С. 66–71;
34. Zhang J., Luo R., Yang C. A multi-wall carbon nanotube-reinforced high-temperature resistant adhesive for bonding carbon/carbon composites // Carbon. 2012. Vol. 50. P. 4922–4925;
35. Wang J.-G., Guo Q.-G., Liu L., Song J.-R. Study on the microstructural evolution of high temperature adhesives for graphite bonding // Carbon. 2002. Vol. 40. P. 2447–2452;
36. Кардашов Д.А. Синтетические клеи. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Химия, 1976;
37. Качалов А.Ю., Баженов В.Е., Белов В.Д., Матвеев С.В., Фадеев А.В. Определение коэффициента теплопередачи между отливкой из сплава ВТ20Л и графитовой формой // Материалы конференции: Всероссийская научно-техническая конференция "Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и антикоррозионной защиты легких сплавов", ФГУП "ВИАМ". - М.: ВИАМ, 2019. - С.84-99;

38. С.Н. Виноградов, К.В. Таранцев, О.С. Виноградов. Выбор и расчет теплообменников: Учебное пособие. Пенза: Пензенский государственный университет, 2001. 100 с;
39. D. Wang, C. Zhou, G. Xu. Heat transfer behavior of top-side–pouring twin–roll casting // J. Mater. Process. Technol. – 2014. – V. 214. – P. 1275–1284;
40. W.D.Griffiths, K Kawai. The effect of increased pressure on interfacial heat transfer in the aluminium gravity die casting process // J. Mater. Sci. – 2010. – V. 45. – №9. – P. 2330–2339;
41. A. Prasad, I.F. Bainbridge. Experimental determination of heat transfer within the metal/mold gap in a DC casting mold. Part II. Effect of casting metal, mold material, and other casting parameters // Metall. Mater. Trans. – 2013. –V. 44. № 7. – P. 3099–3113;
42. Y. Nishida, W. Droste, S. Engler. The air–gap formation process at the casting–mold interface and the heat transfer mechanism through the gap // Metall. Trans. B. –1986. –V. 17. – P. 833–844;
43. M. Sutaria, V. H. Gada, A. Sharma. Computation of feed–paths for casting solidification using level–set method // J. Mater. Process. Technol. – 2012. – V. 212. – P. 1236–1249;
44. G. Palumbo, V. Piglionico, A. Piccininni. Determination of interfacial heat transfer coefficients in a sand mould casting process using an optimised inverse analysis // Appl. Therm. Eng. – 2015. – V. 78. – P. 682–694;
45. Z. Sun, H. Hu, X Niu. Determination of heat transfer coefficients by extrapolation and numerical inverse methods in squeeze casting of magnesium alloy AM60 // J. Mater. Process. Technol. – 2011. – V. 211. – P. 1432–1440;
46. LiqiangZhang, Luoxing Li, Hui Ju. Inverse identification of interfacial heat transfer coefficient between the casting and metal mold using neural network// Energy Conversion and Management. –2010. –V.51. –P. 1898–1904;

47. S.N. Kulkarni, D.K. Radhakrishna. Effect of casting/mould interfacial heat transfer during solidification of aluminium alloys cast in CO₂–sand mould // Materials Science–Poland. – 2011. – V. 29. – № 2. – P. 135–142;
48. L. Chen, Y. Wang, L. Peng. Study on the interfacial heat transfer coefficient between AZ91D magnesium alloy and silica sand // Exp. Therm. Fluid Sci. –2014. – V. 54. – P. 196–203;
49. R.K. Nayak, S. Sundarraj. Selection of Initial Mold–Metal Interface Heat Transfer Coefficient Values in Casting Simulations—a Sensitivity Analysis // Metallurgical and Materials Transactions. – 2010. – V. 41, – P.151–160;
50. Бибииков, Е. Л. Литье титановых сплавов: Учебное пособие / Е.Л. Бибииков, А.А. Ильин. - Москва : Альфа-М: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 304 с;
51. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие / А. Г. Илларионов, А. А. Попов. – Екатеринбург : Изд–во Урал. ун–та, 2014. – 137 с;
52. Зверева, М. И. Исследование влияния содержания примесей на структуру и свойства литейного сплава ВТ20Л / М. И. Зверева // Молодежный научно–технический вестник. – 2016. – № 7. – С. 1;
53. Титановые сплавы. Производство фасонных отливок из титановых сплавов / Е. Л. Бибииков, С. Г. Глазунов, А. А. Неуструев, Г. Л. Ходоровский, К. С. Ясинский. Москва: Металлургия, 1983г, 296 с;
54. Повышение качества художественных отливок, изготавливаемых в формы из холоднотвердеющих смесей, за счет устранения пригара и увеличения жидкотекучести медных сплавов: диссертация ... кандидата технических наук: 05.16.04 / Титов Андрей Юрьевич; [Место защиты: НИТУ «МИСиС»]. - Москва, 2016. - 123 с;
55. Глазунов С. Г. Производство фасонных отливок из титановых сплавов/ С. Г. Глазунов, А.А. Неуструев– Москва: Металлургия, 1998.– 292 с;
56. А.Б. Колдаев, К.К. Ясинский, Б.И. Бутцев. Исследование поверхностных газонасыщенных слоев отливок из титанового сплава ВТ5Л

при литье в различные формы// Научно–технический сборник. Вопросы Авиационной науки и техники.1989г. №3. С. 51–58;

57. В.Д. Белов, А.В. Фадеев, П.В. Петровский, С.П. Павлинич, П.В. Аликин, А.Ю. Качалов. Некоторые аспекты применения литейных форм из неметаллических материалов, изготовленных на базе цифровых технологий. Литейщик России.2015г.№5;

58. Si–Young Sung, Young–Jig Kim. Alpha–case formation mechanism on titanium investment castings // Materials Science and Engineering A. 2005. Vol. 405. Issue 1–2. P. 173–177;

59. M. Koike, Z. Caib, H. Fujiia, M. Breznerb, T. Okabe. Corrosion behavior of cast titanium with reduced surface reaction layer made by a face–coating method // Biomaterials. 2003. Vol. 24 Issue 25. P. 4541–4549;

60. Federico Smeacetto, Milena Salvo, Monica Ferraris. Protective coatings for induction casting of titanium // Surface & Coatings Technology. 2007. Vol. 201. Issue 24. P. 9541–9548;

61. Белов В.Д., Фадеев А.В., Иващенко А.И., Бельтюкова С.О. Технология вакуумной плавки и литья: вакуумная плавка и производство фасонных отливок из титана и титановых сплавов. – М.: МИСиС. 2013;

62. И.Р. Мухамадеев, О.Б. Деменок, А.А. Ганеев, С.П. Павлинич, П.В. Аликин. Выбор связующих на водной основе для оболочковых форм литья по выплавляемым моделям титановых сплавов. Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2015.Т.15 №3. С. 95–104;

63. Si–Young Sung, Bong–Jae Choi, Young–Jig Kim. Alpha–Case Controlled Titanium Alloys Casting // Ti–2007 Science and Technology// Ti–2007 Science and Technology. 2007. Vol. 2. Pres.74;

64. Xu Cheng, Lianjing Chai, Guoqing Wu, Hong Wang,Hai Nan. Evaluation of interfacial interactions between Ti–6Al–4V and mold use Ti–added backup coat in investment casting// The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International. 2016. Vol. 47, No.5. P. 2313–2318;

65. Chonghe Li, Mingyang Li, Hao Zhang, Wajid Ali, Ziwei Qin, Hongbin Wang, Xionggang Lu. Fabrication of Y₂O₃ doped BaZrO₃ coating on Al₂O₃ applied to solidification of titanium alloy// Surface & Coatings Technology. Elsevier Science Publishing Company, Inc. 2017. Vol. 320. P. 146–152;
66. Chonghe Li, Jin He, Chao Wei, Hongbin Wang, Xionggang Lu. Solidification and interface reaction of titanium alloys in the BaZrO₃ shell–mould// Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd. 2015. Vol. 828–829. P. 106–111;
67. М.С. Варфоломеев, В.С. Моисеев, Г.И. Щербакова. Высокотермостойкие керамические формы для литья фасонных отливок из титановых сплавов//Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия.2016.№6. С.49–54;
68. Pei–Ling Lai, Wen–Cheng Chen, Jen–Chyan Wang, Ta–Ko Huang, Chun–Cheng Hung. A newly developed calcia/titanium modified magnesia–based investment mold for titanium casting // Materials Science and Engineering C. 2011. Vol. 31. Issue 2. P. 144–150;
69. А.А. Ганеев , А.О. Деменок , С.В. Бакерин , Б.А. Кулаков , И.Р. Мухамадеев , А.Р. Гарипов. Расчет физико–химического взаимодействия титановых сплавов с материалами литейной формы.// Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия.2016.Т.16,№3. С.70–78;
70. R. L. Saha, K. T. Jacob. Casting of Titanium and its Alloys // Def Sci 3. 1986. Vol. 36. No. 2. P. 121–141;
71. Limin Jia, Daming Xu, Min Li, Jingjie Guo , Hengzhi Fu. Casting Defects of Ti–6Al–4V Alloy in Vertical Centrifugal Casting Processes with Graphite Molds // Met. Mater. Int. 2012. Vol. 18. No. 1. P. 55–61;
72. Wu Shi Ping, Liu Dong Rong, Guo Jing Jie, Li Chang Yun, Su Yan Qing, Fu HengZhi. Numerical simulation of microstructure evolution of Ti–6Al–4V alloy in vertical centrifugal casting // Materials Science and Engineering A. 2006. Vol. 426. Issue 1–2. P. 240–249;

73. Myoung–Gyun Kim, Shae. K. Kim and Young–Jig Kim. Effect of Mold Material and Binder on Metal–Mold Interfacial Reaction for Investment Castings of Titanium Alloys // *Materials Transactions*. 2002. Vol. 43. No. 4. P. 745–750;
74. J. Barbosa, A. Caetano Monteiro, C. Silva Ribeiro. Controlled Residual Surface Contamination of γ TiAl, Induction Melted in Ceramic Crucibles // *European Congress on Advanced Materials, Processes and Applications – Materials Week 2001*. 2001. P. 100–108;
75. Определение точности изготовления отливок из сплава ВТ20Л, полученных по безмодельной технологии / В. Е. Баженов, А. В. Фадеев, С. С. Асеева [и др.] // *Литейщик России*. – 2016. – № 7. – С. 23–28;
76. Пекарш А.И., Феоктистов С.И., Колыхалов Д.Г., Шпорт В.И. Координатно–измерительные машины и комплексы // *Наука и технологии в промышленности*. 2011. № 3. С. 36–48;
77. Zhao F., Xu X., Xie S.Q. Computer–Aided Inspection Planning— The state of the art // *Computers in Industry*. 2009. Vol. 60. P. 453–466;
78. Румянцев С., Василенко А., Федоров Н. Применение компьютерной томографии высокого разрешения в сфере металлообработки // *Вектор высоких технологий*. 2013. № 3. С. 50–57;
79. Зверев М. Применение компьютерной томографии (КТ) для контроля металлических отливок и деталей // *Металлообработка и станкостроение*. 2011. № 9. С. 29–33;
80. Малючек Т., Федорова И. Применение фотограмметрических измерительных систем V–STARS в промышленности // *САПР и графика*. 2014. № 10. С. 98–101;
81. Vagovský J., Buranský I., Görög A. Evaluation of Measuring Capability of the Optical 3D Scanner // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 100. P. 1198–1206;
82. Brajliah T., Tasic T., Drstvensek I., Valentan B., Hadzistevic M., Pogacar V., Balic J., Acko B. Possibilities of Using Three Dimensional Optical

Scanning in Complex Geometrical Inspection // *Strojniški vestnik — Journal of Mechanical Engineering*. 2011. Vol. 57. Is. 11. P. 826—833;

83. Лосенкова М.В., Белов М.В., Устинова Г.М. Некоторые особенности контроля геометрии литых деталей методом бесконтактной оптической оцифровки // 5-ая международная научно-практическая конференция “Прогрессивные литейные технологии”: Сборник трудов (19—23 октября 2009 г., НИТУ “МИСиС”). М.: Лаборатория рекламы и печати, 2009. С. 37—40;

84. Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Чернышев С.И., Геращенко Я.Н. Современное оборудование и программное обеспечение обратного инжиниринга промышленных изделий // Сучасні технології в машинобудуванні (Современные технологии в машиностроении): сб. матер. Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. Вып. 5. С. 138—152;

85. Ошкин Д. To be 3D or not to be... // *CADMaster*. 2007. № 7. С. 108—112;

86. Коровин Ю. И. Атомно-эмиссионный спектральный анализ // Большая российская энциклопедия. Том 2. Москва, 2005, стр. 478;

87. В.Е. Баженов, А.В. Колтыгин, Ю.В. Целовальник, А.В. Санников. Определение коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи для моделирования процесса литья алюминия в графитовые формы // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2017 г. №1. С 40–52;

88. А.В. Фадеев и др. Курс лекций «Технология вакуумной плавки и литья» НИТУ «МИСиС», Москва, 2013 г;

89. А.В. Колтыгин, В.Е. Баженов, А.В. Фадеев. Совершенствование технологии литья крупногабаритных деталей авиационных двигателей из сплава ВТ20Л с использованием методов компьютерного моделирования // Цветные металлы. – 2015 г. № 5. С 21–25;

90. M. Boivineau, C. Cagran, D. Doytier, e.a. Thermophysical Properties of Solid and Liquid Ti–6Al–4V (TA6V) Alloy // *International Journal of Thermophysics*. –2006. –V. 27. – №2;

91. Nenad Milosevic, Ivana Aleksic. Thermophysical properties of solid phase Ti–6Al–4V alloy over a wide temperature range // *Int. J. Mat. Res.* – 2012. – № 6. – P. 707–714;
92. Robert F. Brooks, James A. J. Robinson, Lindsay A. The enthalpy of a solid and liquid titanium–aluminium–vanadium alloy // *High Temperatures–High Pressures.* – 2004. – V.36. – P. 193–198;
93. John Jian–Zhong Li. Study of liquid metals by electrostatic levitation // *Ph.D. Thesis. California Institute of Technology Pasadena, California.* –2009;
94. Jonathan Richard Raush. Thermophysical and thermochemical property measurement and prediction of liquid metal titanium alloys with applications in additive manufacturing // *Ph.D. Thesis. Louisiana State University.* – 2016;
95. E.I. Zhmurikov, I.V. Savchenko, S.V. Stankus. Measurements of thermal properties of graphite composites for neutron target converter // *Vestnik NGU. Seriya: Fizika.* – 2011. –V. 6. – №2. –P. 77–84;
96. R.E.Taylor, H. Groot. Thermophysical properties of POCO graphite: AFOSR–TR–78–1375 (Report) // *Indiana: Purdue University Lafayette Properties Research Laboratory,* – 1978;
97. Prabhu K.N., Chowdary B., Venkataraman N. Casting/ mold thermal contact heat transfer during solidification of Al–Cu–Si alloy (LM 21) plates in thick and thin molds // *J. Mater. Eng. Perform.* 2005. Vol. 14. No. 5. P. 604–609;
98. Prabhu K.N., Griffiths W.D. Assessment of metal/mould interfacial heat transfer during solidification of cast iron // *Mater. Sci. Forum.* 2000. Vol. 329–330. P. 455– 460;
99. Jonathan Richard Raush. Thermophysical and thermochemical property measurement and prediction of liquid metal titanium alloys with applications in additive manufacturing // *Ph.D. Thesis. Louisiana State University.* – 2016;

100. Sun Yafei, Tu Yongjun, Sun Jing, Niu Dongjie. Effect of Temperature and Composition on Thermal Properties of Carbon Steel // Chinese Control and Decision Conference. 2009;
101. А. Б. Колдаев, К. К. Ясинский, Б. И. Бутцев. Исследование поверхностных газонасыщенных слоев отливок из титанового сплава ВТ5Л при литье в различные формы // Научно–технический сборник. Вопросы Авиационной науки и техники. 1989г. №3. С. 51–58;
102. R. L. Saha, K. T. Jacob. Casting of Titanium and its Alloys // Def Sci 3. 1986. Vol. 36. No. 2. P. 121–141;
103. Клей для соединения и ремонта элементов графитовых литейных форм / В. Е. Баженов, А. В. Фадеев, А. В. Колтыгин [и др.] // Клеи. Герметики. Технологии. - 2016. - № 5. - С. 6-11;
104. Белов В. Д., Фадеев А.В., Петровский П.В., Павлинич С.П., Аликин П.В., Качалов А.Ю. Некоторые аспекты применения литейных форм из неметаллических материалов, изготовленных на базе цифровых технологий // Литейщик России. - 2015. - №5. - С.20-23;
105. Стратегии обработки. Черновая, получистовая и чистовая обработки // Вунивере.ру: [сайт]. – 2021. - URL: <https://vunivere.ru>;
106. В.Д. Белов, А.В. Фадеев, С.П. Павлинич, А.Ю. Качалов, М.В. Гамазина, П.В. Аликин. Влияние материала формы на качество отливок из титановых сплавов. Литейщик России. 2015г №3. С. 19–26;
107. Фазовые и структурные превращения, происходящие в титановом сплаве ВТ20Л под действием водорода / С. В. Скворцова, А. А. Ильин, Г. В. Гуртовая [и др.] // Металлы. – 2005. – № 2. – С. 45–54;
108. Производство отливок из сплавов цветных металлов: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению Metallurgy / [А. В. Курдюмов и др.]; под общ. ред. В. Д. Белова ; М–во образования и науки РФ, Федеральное гос. авт. образовательное учреждение высш. проф. образования "Нац. исслед. технологический ун–т "МИСиС", Каф.

технологии литейных процессов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Изд. дом МИСиС, 2011. – 614 с.

2013 г.

40/10 - 31 618

Договор № 02.G25.31.0009

между Открытым Акционерным Обществом
«Уфимское моторостроительное производственное объединение»
и Министерством образования и науки Российской Федерации об условиях
предоставления и использования субсидии на реализацию комплексного
проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с
участием Федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего профессионального образования «Национальный
исследовательский технологический университет «МИСиС»

г. Москва

«12» декабря 2013 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации, именуемое в дальнейшем «Минобрнауки России», зарегистрированное в Министерстве Российской Федерации по налогам и сборам (межрайонной инспекцией МНС России № 46 по г. Москве) 23 апреля 2004 г. за основным государственным регистрационным номером 1047796287440, в лице Заместителя Министра образования и науки Российской Федерации Повалко Александра Борисовича, действующего на основании Доверенности от 20 декабря 2012 года № ДЛ-250, с одной стороны, и Открытое Акционерное Общество «Уфимское моторостроительное производственное объединение» (ОАО «УМПО»), именуемое в дальнейшем «Получатель», зарегистрированное в инспекции Министерства Российской Федерации по налогам и сборам по Калининскому району г. Уфы Республики Башкортостан 09 октября 2002 г. за основным государственным регистрационным номером 1020202388359, в лице Управляющего директора Артюхова Александра Викторовича, действующего на основании Доверенности №1Д-5823 от 13.07.2011 г., другой стороны, именуемые в дальнейшем Стороны, в соответствии с пунктом 5 Правил предоставления субсидий на государственную поддержку кооперации российских высших учебных заведений, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 (Собрание законодательства Российской Федерации, 2010, № 16, ст. 1905; 2011, № 22, ст. 3180; 2012, № 42, ст. 5727), и на основании решения конкурсной комиссии по отбору организаций на право получения субсидий на реализацию комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства (протокол от 24 декабря 2012 г.), заключили настоящий договор о нижеследующем:

1. Предмет договора

1.1. Предметом настоящего договора является предоставление Минобрнауки России субсидии из федерального бюджета Получателю с целью реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «Создание производства высоконагруженных крупногабаритных тонкостенных деталей из титановых сплавов для авиационно-космического турбиностроения» шифр 2012-218-03-102 (далее – комплексный проект), осуществляемого Получателем в кооперации с Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего



профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (далее – Головной исполнитель).

1.2. Получатель направляет средства указанной субсидии на возмещение затрат, связанных с выполнением научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ (далее – НИОКТР), проводимых Головным исполнителем в рамках комплексного проекта в соответствии с договором на выполнение НИОКТР от 21 ноября 2012 г. № 40/10-30958 (далее - договор на выполнение НИОКТР).

1.3. Условиями предоставления субсидии являются:

1.3.1. Создание высокотехнологичного производства новой (усовершенствованной) продукции (услуг)/высокой технологии.

1.3.2. Выполнение Головным исполнителем в рамках комплексного проекта не менее 60 процентов общего стоимостного объема НИОКТР, затраты на которые возмещаются за счет средств субсидии, самостоятельно, без привлечения третьих лиц.

1.3.3. Направление Получателем на реализацию комплексного проекта собственных средств в размере не менее 100 процентов от размера предоставляемой субсидии в каждом календарном году реализации комплексного проекта. При этом не менее 20 процентов указанных средств должны быть использованы на финансирование НИОКТР по комплексному проекту.

1.4. Общий размер субсидии составляет 198 000 000 (Сто девяносто восемь миллионов) рублей, в том числе:

в 2013 г. – 50 000 000 рублей,

в 2014 г. – 60 000 000 рублей,

в 2015 г. – 88 000 000 рублей.

1.5. Перечисление субсидии из федерального бюджета осуществляется в установленном порядке на расчетный счет Получателя, указанный в настоящем договоре, по результатам рассмотрения отчета Получателя о расходах, связанных с выполнением НИОКТР Головным исполнителем в рамках комплексного проекта и подлежащих возмещению за счет средств субсидии.

1.6. Распределение прав на результаты интеллектуальной деятельности между Получателем и Исполнителем НИОКТР определяется законодательством Российской Федерации.

2. Обязанности Сторон

2.1. Минобрнауки России обязано:

2.1.1. Перечислить средства субсидии на расчетный счет Получателя, указанный в настоящем договоре, в размере и порядке, предусмотренном пунктами 1.4 - 1.5 настоящего договора.

2.1.2. Осуществлять контроль за соблюдением Получателем условий, установленных настоящим договором, включая выездные контрольные проверки по месту создания высокотехнологичного производства.

2.2. Получатель обязан:



2.2.1. Использовать полученную субсидию в соответствии с ее целевым назначением и условиями предоставления субсидии, указанными в пунктах 1.1 - 1.3 настоящего договора.

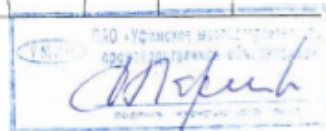
2.2.2. Дополнительно направить на реализацию комплексного проекта собственные средства в размере не менее 200 000 000 (Двести миллионов) рублей. При этом 40 000 000 (Сорок миллионов) рублей указанных средств должны быть направлены на финансирование НИОКТР по комплексному проекту.

2.2.3. Предоставлять Минобрнауки России не менее одного раза в год необходимые информационные материалы по комплексному проекту для проведения публичных мероприятий.

2.2.4. Участвовать в мероприятиях Минобрнауки России с презентациями результатов выполнения работ по комплексному проекту.

2.2.5. Обеспечить достижение следующих значений показателей результативности реализации комплексного проекта:

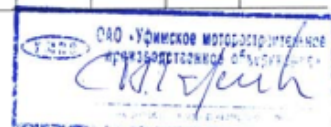
№ п/п	Наименование	Значение								
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	ВСЕГО
1	Объем новой и усовершенствованной высокотехнологичной продукции (услуг), произведенной с использованием результатов выполненных НИОКТР (млн. руб.)	-	-	-	42,6	85,1	801,9	896,2	978,3	2804,1
2	Объем собственных средств, полученных организацией-получателем субсидии, направленных на реализацию проекта по созданию высокотехнологичного производства с участием высшего учебного заведения или государственной научной организации.	52	60	88	-	-	-	-	-	200
	в том числе на НИОКТР в рамках проекта (млн. руб.)	5	15	20	-	-	-	-	-	40
3	Количество молодых ученых высшего учебного заведения и/или государственной научной организации, привлеченных к выполнению НИОКТР в рамках проекта (чел.).	5	5	5	-	-	-	-	-	-
4	Количество студентов, привлеченных к выполнению НИОКТР в рамках проекта (чел.);	5	5	5	-	-	-	-	-	-
5	Количество аспирантов, привлеченных к	5	5	5	-	-	-	-	-	-



№ п/п	Наименование	Значение								
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	ВСЕГО
	выполнению НИОКТР в рамках проекта (чел.);									
6	Количество иных молодых специалистов (инженерно-технических), привлеченных к выполнению НИОКТР в рамках проекта (чел.);	7	7	7	-	-	-	-	-	
7	Количество рабочих мест созданных в ходе реализации проекта (ед.)	2	2	2	15	-	-	-	-	21
	в том числе для молодых ученых (специалистов)	2	2	2	8	-	-	-	-	14
8	Средний размер доходов:									
	- молодых ученых (специалистов),	55000	57000	60000	-	-	-	-	-	57333,3 3
	- студентов,	15000	17000	20000	-	-	-	-	-	17333,3 3
	- аспирантов,	20000	23000	25000	-	-	-	-	-	22666,6 7
	- инженерно-технических работников, полученных от участия в выполнении НИОКТР по проекту (руб./чел.)	45000	47000	50000	-	-	-	-	-	47333,3 3
9	Доля затрат на привлечение молодых ученых (специалистов), аспирантов, студентов в общем размере фонда оплаты труда по проекту (%).	57,6	52,4	55,6	-	-	-	-	-	-
10	Доля доходов молодых ученых (специалистов), студентов, аспирантов, полученных от участия в выполнении НИОКТР по проекту в общем доходе молодых ученых (специалистов), аспирантов, студентов (%).	85,9	86,7	87,5	-	-	-	-	-	-
11	Количество научных публикаций в ведущих российских и зарубежных журналах по тематике НИОКТР, выполняемых по проекту (шт.), в том числе:	2	4	5	-	-	-	-	-	11
	в российских журналах (шт.)	2	3	4	-	-	-	-	-	9
	в зарубежных журналах (шт.)	0	1	1	-	-	-	-	-	2
12	Количество: - заявок на выдачу российских патентов по тематике проекта,	1	1	1	-	-	-	-	-	3

Итого: 11
Марки

№ п/п	Наименование	Значение								
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	ВСЕГО
	поданных организацией-получателем субсидии, высшим учебным заведением, государственной научной организацией или их непосредственными исполнителями работ по проекту (шт.);									
	- заявок на выдачу зарубежных патентов по тематике проекта, поданных организацией-получателем субсидии, высшим учебным заведением, государственной научной организацией или их непосредственными исполнителями работ по проекту (шт.);	0	1	1	1	-	-	-	-	3
	- патентов (российских и зарубежных) по тематике проекта, полученных организацией-получателем субсидии, высшим учебным заведением, государственной научной организацией или их непосредственными исполнителями работ по проекту (шт.)	0	0	1	-	-	-	-	-	1
Иные значения показателей результативности реализации комплексного проекта:										
13	Наименование разрабатываемой продукции: Высоконагруженные крупногабаритные тонкостенные корпусные детали из титановых сплавов для авиационно-космического турбиностроения									
14	Место создания высокотехнологичного производства: Российская Федерация, Республика Башкортостан, город Уфа, Открытое акционерное общество «Уфимское моторостроительное производственное объединение»									
15	Выполнение Плана-графика работ по комплексному проекту, утвержденному Получателем	+	+	+						
16	Достижение значений Технических требований, утвержденных Получателем, к продукции, разрабатываемой по проекту с использованием результатов, полученных ВУЗом по договору с Получателем от 21 ноября 2012 г. № 40/10-30958, в том числе:	В соответствии с Планом-графиком работ по комплексному проекту		В полном объеме						
16.1	Максимальный габаритный									



№ п/п	Наименование	Значение								
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	ВСЕГО
	размер высоконагруженной крупногабаритной тонкостенной детали – 2300 мм									
16.2	Максимальный габаритный размер тонкостенной литой заготовки (диаметр) – 1500 мм			+						
16.3	Минимальная толщина стенки литой заготовки на габаритном размере 1500 мм – 3 мм			+						
16.4	Максимальная масса литой заготовки – до 200 кг			+						
16.5	Размерная точность литой заготовки на габаритном размере 1500-2200 мм - суммарный допуск на длиновой размер 2,4 мм			+						

2.2.6. Ежегодно в срок до 5 июня и 15 ноября представлять в Минобрнауки России отчет о расходах, связанных с выполнением Головным исполнителем НИОКТР в рамках комплексного проекта и подлежащих возмещению за счет средств субсидии.

2.2.7. Ежегодно в срок до 15 июля текущего года и 20 января следующего календарного года представлять в Минобрнауки России:

- отчет об использовании средств субсидии;
- отчет о выполненных работах по реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства;
- отчет о достигнутых значениях показателей результативности реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства.

2.2.8. Предоставлять по запросу Минобрнауки России в установленные Минобрнауки России сроки информацию и документы, необходимые для проведения проверок исполнения Получателем своих обязательств по настоящему договору, а также оказывать содействие представителям Минобрнауки России при проведении подобных проверок.

2.2.9. В течение 5-ти лет после окончания действия настоящего договора в части реализации комплексного проекта с использованием средств субсидии создания комплексного проекта ежегодно представлять в Минобрнауки России информацию о высокотехнологичной продукции, созданной (разработанной) в рамках комплексного проекта, а также о ходе реализации комплексного проекта и объемах выпускаемой продукции.

2.2.10. В случае наступления обстоятельств, препятствующих реализации комплексного проекта в установленный срок или способных повлиять на исполнение Получателем своих обязательств по настоящему договору, незамедлительно в письменном виде уведомить об этом Минобрнауки России.



2.2.11. Информировать Минобрнауки России о внесении изменений в договор на выполнение НИОКТР в течение 5-ти рабочих дней с момента подписания соглашения о внесении указанных изменений.

2.2.12. Возвратить в доход федерального бюджета в соответствии с бюджетным законодательством Российской Федерации:

остаток неиспользованной субсидии при отсутствии у Получателя потребности в указанной субсидии;

субсидию в случае ее нецелевого использования.

3. Ответственность Сторон

3.1. Сторона, не исполнившая свои обязательства по настоящему договору или исполнившая эти обязательства ненадлежащим образом, несет за это ответственность в соответствии с законодательством Российской Федерации, если не докажет, что надлежащее исполнение обязательств по настоящему договору оказалось невозможным вследствие обстоятельств непреодолимой силы (форс-мажорных обстоятельств).

3.2. В случае установления по итогам проверок, проведенных Минобрнауки России или иными уполномоченными государственными органами контроля и надзора, факта нарушения Получателем целей и условий предоставления субсидии, средства субсидии подлежат взысканию в доход федерального бюджета в порядке, установленном бюджетным законодательством Российской Федерации.

3.3. Непредставление или несвоевременное представление Получателем отчетных документов и информации, предусмотренных настоящим договором, является существенным нарушением его условий и служит основанием для возврата предоставленной Получателю субсидии в полном объеме.

4. Порядок разрешения споров

4.1. Споры, которые могут возникнуть при исполнении настоящего договора, Стороны разрешают путем проведения переговоров.

4.2. При недостижении согласия Сторон спор передается на рассмотрение в Арбитражный суд г. Москвы.

5. Дополнительные условия договора

5.1. При выполнении настоящего договора Стороны при необходимости определяют перечень сведений, признаваемых конфиденциальными.

5.2. В случае опубликования в средствах массовой информации или размещения в сети Интернет сведений о НИОКТР по комплексному проекту и их результатах, а также в случае демонстрации указанных результатов на выставочно-ярмарочных мероприятиях Получатель обязан сделать указание о том, что соответствующие работы выполнены (выполняются), результаты достигнуты в ходе реализации комплексного проекта при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки России).



5.3. Изменение настоящего договора возможно по инициативе каждой из Сторон и осуществляется в письменной форме в виде дополнительных соглашений к настоящему договору, которые являются его неотъемлемой частью.

5.4. Все вопросы, не урегулированные настоящим договором, решаются Сторонами в соответствии с законодательством Российской Федерации.

6. Срок действия, условия и порядок расторжения договора

6.1. Настоящий договор вступает в силу с момента его подписания Сторонами и действует до полного исполнения Сторонами обязательств по настоящему договору.

6.2. Настоящий договор может быть прекращен досрочно по взаимному соглашению Сторон.

6.3. Настоящий договор расторгается в одностороннем порядке по требованию Минобрнауки России при письменном извещении об этом Получателя и указании причины расторжения в следующих случаях:

6.3.1. Невозможности реализации комплексного проекта на условиях, предусмотренных настоящим договором;

6.3.2. Расторжения договора на выполнение НИОКТР, если в ходе выполнения НИОКТР выяснится невозможность достижения требуемых результатов вследствие обстоятельств, не зависящих от сторон договора на выполнение НИОКТР;

6.3.3. Нецелевого использования Получателем средств субсидии;

6.3.4. Оплаты Получателем за счет субсидии НИОКТР, выполненных Головным исполнителем до заключения настоящего договора;

6.3.5. Одновременного финансирования НИОКТР, указанных в договоре на выполнение НИОКТР, за счет средств субсидии и иных источников.

6.4. В случае расторжения настоящего договора по основанию, предусмотренному в пункте 6.3.1, Получатель обязан возвратить предоставленную субсидию в полном объеме в течение 10 рабочих дней с момента получения от Минобрнауки России извещения о расторжении настоящего договора, если не докажет, что невозможность реализации комплексного проекта обусловлена обстоятельствами непреодолимой силы. При наличии таких доказательств Получатель обязан возвратить неиспользованную часть перечисленных ему средств субсидии в течение 10 рабочих дней с момента получения от Минобрнауки России извещения о расторжении настоящего договора.

6.5. В случае расторжения настоящего договора по основанию, предусмотренному в пункте 6.3.2, Получатель обязан в течение 10 рабочих дней с момента получения от Минобрнауки России извещения о расторжении настоящего договора возвратить Минобрнауки России неиспользованную часть субсидии, предоставив документы, подтверждающие понесенные расходы.

6.6. В случае расторжения настоящего договора по основаниям, предусмотренным в пунктах 6.3.3 – 6.3.5, Получатель обязан возвратить предоставленную субсидию в полном объеме в течение 10 рабочих дней с момента получения от Минобрнауки России извещения о расторжении настоящего договора.



6.7. В случае расторжения настоящего договора по взаимному соглашению Стороны в тридцатидневный срок с даты принятия решения о расторжении настоящего договора согласовывают объем и стоимость работ, фактически выполненных по договору на выполнение НИОКТР, а также размер неиспользованной субсидии, подлежащей возврату Получателем в доход федерального бюджета.

6.8. Настоящий договор составлен в 2 (двух) экземплярах, имеющих одинаковую юридическую силу.

7. Платежные реквизиты

Минобрнауки России

Место нахождения: 125993,
г. Москва, ул. Тверская, 11, стр. 4
Тел. (495) 629-70-62

Банковские реквизиты:
ИНН 7710539135
Межрегиональное операционное
УФК Министерство образования и
науки Российской Федерации
лицевой счет № 03951000740
Оперу-1 Банка России, г. Москва
р/с 40105810700000001901
БИК 044501002
КПП 771001001
ОКПО 00083380
ОКВЭД 75.11.11

ОКАТО 45286585000

Открытое акционерное общество
«Уфимское моторостроительное
производственное объединение»

Место нахождения: 450039
Республика Башкортостан, г. Уфа, ул.
Ферина, 2.

Тел. (347)2383663 , факс: (347)2383744

Банковские реквизиты:
ИНН 0273008320
Башкирское отделение Сбербанка РФ №
8598 г. Уфа

к/с 30101810300000000601
р/с № 40702810906000013453

БИК 048073601
КПП 997850001
ОКОПФ 47
ОКПО 07503916
ОКВЭД 35.30.13

8. Подписи Сторон

Минобрнауки России

Заместитель Министра образования
и науки Российской Федерации



Повалко А.Б.

Получатель

Управляющий директор
ОАО «УМПО»



Артюхов А.В.





УТВЕРЖДАЮ
Управляющий директор
ПАО «УМПО»
Е.А. Семивеличенко
«07» июня 2016 г.

АКТ

выпуска установочной партии
Договор от «12» февраля 2013 г. № 02.G25.31.0009

«07» июня 2016 г.

Комиссия в составе:

Комиссия в составе:

Председателя	Заместителя управляющего директора - технического директора ПАО «УМПО»	Симонова Сергея Анатольевича
членов комиссии	Зам. начальника УТРИП	Аликина Павла Владимировича
	Зам. главного металлурга	Никифорова Павла Николаевича
	Начальника бюро КОМО	Бакерина Сергея Васильевича
секретаря комиссии	Ведущего специалиста УТРИП	Усмановой Елизаветы Игоревны

назначенная распоряжением по ОАО «УМПО» от «28» января 2013 г. №12, в период с «07» июня 2016 г. по «07» июня 2016 г. проверила факт выпуска на ПАО «УМПО» установочной партии высоконагруженных крупногабаритных тонкостенных корпусных деталей из титановых сплавов ТУ №МГТК.387115.002ТУ.

1. Комиссии предъявлено.

- 1.1. Установочная партия высоконагруженных крупногабаритных тонкостенных корпусных деталей из титановых сплавов «Корпус разделительный» для газотурбинного двигателя ПД-14 в количестве 1 шт.
- 1.2. Комплект рабочей конструкторской документации МГТК.387115.001 на оснастку для изготовления высоконагруженных крупногабаритных тонкостенных корпусных деталей из титановых сплавов с литерой «О1».
- 1.3. Комплект рабочей технологической документации МГТК.01310.00010 на комплексный технологический процесс производства высоконагруженных крупногабаритных тонкостенных корпусных деталей из титановых сплавов с литерой О1.

- 1.4. Технические условия МГТК.387115.002ТУ с литерой О1.
1.5. Крупногабаритные тонкостенные литые заготовки «Центральная втулка» (1 шт.) и «Стойка» (5 шт.), ТУ №МГТК.387115.002ТУ.

2. В результате проверки установлено:

2.1. На ПАО «УМПО» в период с 01.07.2015 г. по 02.06.2016 г. осуществлен выпуск следующей партии продукции:

- крупногабаритных тонкостенных корпусных деталей из титановых сплавов «Корпус раздельный» для газотурбинного двигателя ПД-14.
- крупногабаритных тонкостенных литых заготовок «Центральная втулка» и «Стойка».

В соответствии с технической документацией:

Комплект РТД МГТК.01310.00010.

Технические условия МГТК.387115.002ТУ.

Комплект РКД МГТК.387115.001

3. Вывод

Партия продукции выпущена в цехе 1В ПАО «УМПО» с применением комплексного технологического процесса производства высоконагруженных крупногабаритных тонкостенных корпусных деталей из титановых сплавов МГТК.01310.00010 в установленном объеме и соответствует требованиям технических условий МГТК.387115.002ТУ и техническим требованиям по проекту.

Председатель комиссии



Симонов С.А.

Члены комиссии



Аликин П.В.



Никифоров П.Н.



Бакерин С.В.