

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

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»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Москва – 2021

Общая характеристика работы

Актуальность работы

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. Таким образом, наглядно видно, что 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. 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. В настоящее время применяются способы литья в керамические и графитовые формы, получаемые спеканием. Следует отметить, что применение этих способов литья для получения крупногабаритных, тонкостенных и высокой размерной точности отливок вызывает большие трудности. Кроме этого, они включают химически вредные процессы, требуют применения сложного комплекса оборудования и длительной подготовки производства для каждого конкретного изделия.

Метод литья по безмодельной технологии может служить заменой классических традиционно применяемых способов получения крупногабаритных тонкостенных титановых отливок сложной конфигурации, обеспечивая больший выход годного литья и ускоряя процесс запуска в производство новых отливок.

Данная диссертация посвящена научно-техническим проблемам разработки и совершенствования технологии изготовления крупногабаритных тонкостенных 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 работы:

Разработка и исследование безмодельной технологии изготовления крупногабаритных тонкостенных отливок из титанового сплава ВТ20Л. Для достижения этой цели решались следующие задачи:

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 ВТ20Л 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 ВТ20Л в элементах различного сечения при литье в графитовые формы из блочного малозольного графита.

4. Экспериментально определена величина линейной усадки сплава ВТ20Л 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, позволяющие 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 ВТ20Л 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 ВТ20Л, полностью соответствующие требованиям конструкторской документации.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Зависимость величины коэффициента теплопередачи между отливкой из сплава ВТ20Л и графитовой формой в зависимости от температуры расплава в процессе литья.

2. Отсутствие альфированного слоя на поверхности отливок из сплава ВТ20Л при литье по безмодельной технологии в формы из блочного графита марок ГМЗ и ГЭ.

3. Результаты измерения жидкотекучести сплава ВТ20Л в форме из блочного графита ГМЗ.

4. Клеевой состав на основе пульвербакелита для ремонта и соединения элементов формы из графитов ГМЗ и ГЭ.

5. Зависимость величины шероховатости поверхности от количества расплава, пройденного через сечение литейной формы.

6. Точность метода литья по безмодельной технологии в графитовые формы соответствует шестому классу точности в номинальном размере 1000–1600 мм.

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 ВТ20Л 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 в журналах из списка рекомендованных ВАК изданий, и 5 статей - из списка включенных в РИНЦ.

Достоверность научных результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных методик исследования (система компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «ProCast», САПР SolidWorks) и аттестованных измерительных

установок и приборов (спектрометр Thermo Fisher марки ARL 4460 OES, сканирующий электронный микроскоп VEGA3 SBH, профилограф Mar Surf M 300 C, микротвердомер ПМТ-3, универсальная испытательная машина Instron 5569, копер маятниковый Instron SI-1M, оптический микроскоп Carl Zeiss Axio Observer.D1m.). Текст научной работы проверен на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат» (<http://antiplagiat.ru>).

Структура и объем научной работы.

Научная работа состоит из трех частей, включающих в себя 5 глав. Работа изложена на 144 страницах, содержит 18 таблиц, 3 формулы, 69 рисунков и 2 приложения. Библиографический список включает 108 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика темы диссертации, обоснована актуальность, изложены цели, задачи и приведена структура диссертации

В первой главе работы представлен аналитический обзор литературы. Рассмотрены основные аспекты разработки безмодельной технологии для литья крупногабаритных титановых отливок.

В первой части обзора рассмотрены особенности получения крупногабаритных тонкостенных отливок из титановых сплавов. На рисунке 1 представлены отливки «Втулка» и «Стойка» из сплава BT20Л (ТУ 1-92-184-91).

Деталь «Втулка» имеет размеры: диаметр 1160 мм и высота 370 мм, а «Стойка» - 420x245x200 мм. Известно, что такие литые детали из титановых сплавов в настоящее время изготавливаются литьём в керамические и графитовые формы, получаемые спеканием. На основании литературных данных определено, что эти способы литья не позволяют получать отливки с малой толщиной стенки и высокой размерной точностью. Для получения в литой детали 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. Кроме того, эти способы требуют применения сложного комплекса оборудования и длительной подготовки производства для каждого конкретного изделия.

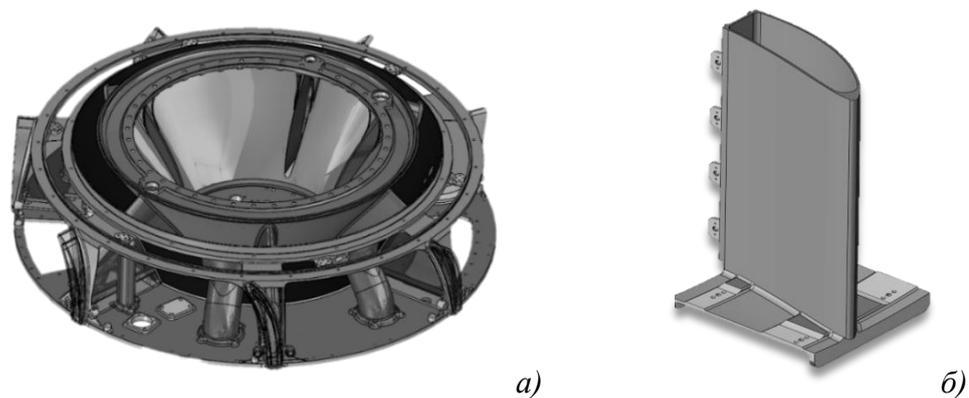


Рисунок 1- Отливки из сплава VT20Л: а - «Втулка», б - «Стойка»

Метод литья по безмодельной технологии должен упростить задачу получения крупногабаритных тонкостенных отливок. В качестве материала для литейных форм можно использовать прессованный в блоки графит различных марок.

В главе даны общие сведения о современных графитовых материалах, применяемых для изготовления литейных форм, и их взаимодействии с металлом в процессе его кристаллизации. Проанализированы марки графита с позиции их применения для изготовления литейных форм при литье титановых сплавов. Также проведен анализ способов соединения между собой графитовых элементов в конструкции литейной формы и их ремонта.

Во второй части литературного обзора рассмотрены особенности моделирования процесса литья и пути повышения адекватности его результатов. Программные продукты для решения таких задач используются преимущественно зарубежные. Установлено, что 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). Его значения колеблются в широком диапазоне в зависимости от условий, в которых происходит теплопередача.

В редких случаях удается достаточно точно определить коэффициент теплопередачи теоретически. Как правило, он определяется экспериментально, и его представляют как зависимость от времени или температуры. Наиболее популярный метод основан на определении температуры разогрева формы и температуры сплава отливки в момент

заливки, кристаллизации и охлаждения. Затем создают математическую модель этого процесса, подбирая значения коэффициента теплопередачи так, чтобы разница между экспериментальными результатами и расчетными значениями температур была минимальной. Эту разницу характеризует функция ошибок Err и описывается уравнением (1):

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

где t_p и $t_{\text{э}}$ – расчётная и экспериментально определённая температура в форме и отливке, °C;

n – количество измерений.

В третьей части обзора внимание было уделено жидкотекучести сплава ВТ20Л в формах из различных материалов. При проектировании технологии литья крупногабаритных тонкостенных отливок жидкотекучесть сплава в форме играет важную роль.

В четвертой части обзора рассмотрено влияние материала формы на шероховатость поверхности отливки. В литературных источниках в основном описаны характеристики классических способов литья в керамические формы и графитовые формы, полученные уплотнением и последующим спеканием. Сведений о применении в качестве материала литейной формы прессованных графитовых блоков практически не приводится.

В пятой части обзора рассмотрено образование альфированного слоя на поверхности отливок из титановых сплавов при взаимодействии с материалами литейных форм. Этот слой обладает повышенной твердостью и является причиной снижения эксплуатационных характеристик. Он образуется при взаимодействии расплава с газами, адсорбированными на поверхности формы и выделяющимися в процессе нагрева из связующих, содержащихся в материале формы. Наиболее интенсивный разогрев формы происходит там, где через её сечение прошло большее количество металла, следовательно, величина альфированного слоя должна быть больше.

Известно, что на взаимодействие расплава с литейной формой также влияет качество её поверхности. Высокая шероховатость формы увеличивает площадь контакта, адсорбцию газов и способствует размыванию формы потоком расплава, что ведет к увеличению шероховатости и загрязнению поверхностного слоя и тела отливки. Поэтому качество отливки, особенно поверхностного слоя, напрямую зависит от шероховатости формы.

В шестой части обзора внимание уделено точности отливок, получаемых по безмодельной технологии. Сведения о размерной точности данного метода не представлены в ГОСТ Р 53464–2009 «Отливки из металлов и сплавов», следовательно, необходимо определить её экспериментально для дальнейшего использования при проектировании технологии литья.

Заключение по первой главе.

В качестве материала литейной формы для изготовления отливок из титановых сплавов целесообразно использовать графиты марок ГМЗ (ТУ 48–4802–86–97) и ГЭ (ТУ 1915-086- 00200851-2007), так как они характеризуются низкой зольностью (до 0,03 %) и достаточной прочностью (более 5,9 МПа).

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.

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.

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.

Информация в литературе о литье крупногабаритных тонкостенных отливок из титановых сплавов достаточно скудная и недостаточная для организации производства конкретных отливок, в связи с этим необходимо проанализировать влияние графитового материала литейной формы на свойства сплава ВТ20Л в отливке и рассчитать величину его усадки.

Во второй главе работы дано описание исходных материалов, изложены методики исследований, описано оборудование, использованное в работе.

Для определения коэффициента теплопередачи между формой из графита ГМЗ и отливкой из сплава ВТ20Л в вакуумном индукционном плавильно-литейном комплексе ВИП-4-20 изготовили слиток цилиндрической формы.

В эксперименте использовали плавильный тигель из графита ГМЗ (ТУ 48-4802-86-97), на дно которого загружалась навеска 2,5 кг готового сплава ВТ20Л (ТУ 1-92-184-91). В

печи создавался вакуум 1,3–0,13 Па. Контроль температуры осуществлялся бесконтактным пирометром с пределом измерений до 3000 °С. Литье в графитовую форму производилось при 2000 °С, её изготавливали из блочного графита марки ГМЗ. Форма состояла из 4 частей. Схема расположения термопар в ней представлена на рисунке 2.

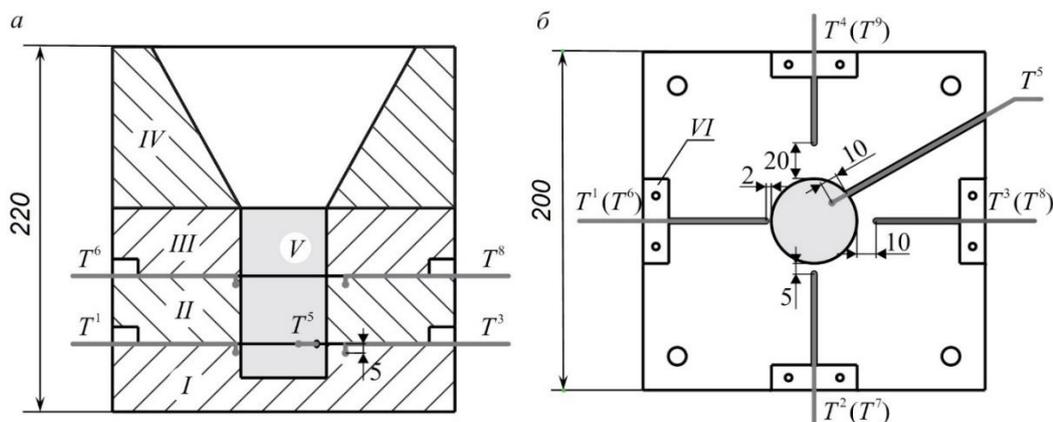


Рисунок 2 – Схема расположения термопар в форме: а – продольный разрез формы (I–IV – части формы, V – отливка); б – вид сверху на плоскость разъема формы (VI – элемент крепления термопары)

Все формообразующие части, поверхности сопряжения литейных форм и образцы для испытаний в этой работе получали механической обработкой на фрезерном станке Dynamic FC3000CNC в НИТУ «МИСиС».

В процессе литья вели запись показаний термопар, размещенных в форме и отливке, с помощью 12-канального термоизмерителя BTM-4208SD («Lutron», Израиль) с интервалом в 1 секунду в течение 1200 с.

Коэффициент теплопередачи определяли с помощью процесса моделирования заливки и затвердевания отливки в программе «ProCast 2016» («ESI Group», Франция). Для этого по химическому составу сплава ВТ20Л (ТУ 1-92-184-91) произвели расчет теплофизических свойств сплава. Химический состав сплава в этом эксперименте и во всей работе определяли с помощью эмиссионного спектрометра фирмы «Thermo Fisher Scientific» ARL 4460, США. Далее для созданной математической модели процесса заливки и затвердевания отливки подбирали значения коэффициента теплопередачи такие, чтобы разница между экспериментальными результатами и расчетными значениями температур в отливке и форме была минимальной. По результатам моделирования построили график зависимости коэффициента теплопередачи от температуры поверхности отливки с момента заливки.

Для определения жидкотекучести использовались U-образные пробы, залитые в формы, изготовленные из стали 20 и графита марки ГМЗ. Процесс плавки был таким же, как в предыдущем эксперименте, и длился 70 мин. В качестве шихты использовали навеску 1,7 кг готового сплава ВТ20Л. Разливку в форму производили при 1800 °С. Затем измеряли длину залитой пробы в различные формы и сравнивали их между собой.

Для соединения графитовых элементов литейной формы и их ремонта разработали клеи четырех составов, которые представлены в таблице 1. Клеи I, II и IV содержат в своём составе пульвербакелит (СФ-015 ГОСТ 18694 - 80), графит и этиловый спирт в различных соотношениях. Клей III готовится путём смешивания графитового порошка с бакелитовым лаком (ЛБС-1 ГОСТ 901–78).

Таблица 1 – 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

Для оценки технологических свойств клея проводили испытания на сдвиг. Для этого образцы из графитов марки ГМЗ и ГЭ склеивались между собой. Далее их помещали в термическую печь и нагревали до температуры склеивания. Всего было 4 температуры нагрева: 200, 400, 600 и 800 °С. После того, как в печи достигалась заданная температура, осуществлялась выдержка в течение 30 минут, затем печь выключали.

Испытания на сдвиг проводились на универсальной испытательной машине INSTRON 5569. На ней также измерялись предел текучести, предел прочности и относительное удлинение образцов из сплава ВТ20Л в этой работе. Металлографический анализ изломов и микроструктуры клеевых швов в этом эксперименте и изучение микроструктуры сплава в этой работе проводились с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Tescan Vega SBH3 с приставкой энергодисперсионного микроанализа Oxford.

При конструировании литниковой системы для опытных отливок «Втулка» и «Стойка» (рисунок 1) опирались на классические методики конструирования титановых отливок и литниковых систем, а также результаты моделирования, учитывая материальную оснащённость вакуумных дуговых установок «ALD VAR 1500SM-Ti» и «НИАТ 833 Д» на ПАО «ОДК-УМПО».

После изготовления элементов формы определяли параметры шероховатости их поверхностей, полученных при различных режимах резания и при применении различных инструментов. Измерения проводились контактным методом с помощью прибора MarSurf M 300C.

Для изучения альфированного слоя из отливки вырезали образцы в тех участках, в которых производили измерения шероховатости поверхности. Из них изготовили шлифы, которые подвергли травлению для выявления структуры. В качестве травителя использовали раствор кислот: плавиковая кислота – 1 часть, азотная кислота – 1 часть, дистиллированная вода – 3 части.

Образцы для испытания на ударную вязкость сечением 10x10 мм по ГОСТ 9454–78 и образцы на растяжение диаметром 5 мм по ГОСТ 1497–84 вытачивали из частей отливки «Втулка». Измерения ударной вязкости KCU проводили на маятниковом копре Instron SI-1M.

Для анализа размерной точности отливок «Втулка» и «Стойка» использовали бесконтактную систему оптической оцифровки ATOS II XL 400 (Advanced Topometric Sensor, Германия).

В третьей главе представлены результаты исследования моделирования процесса литья и разработка технологии изготовления опытных крупногабаритных отливок из сплава ВТ20Л.

После заливки цилиндрического слитка в форму (рисунок 2) создали математическую модель этого процесса по полученным значениям температур для определения значения коэффициента теплопередачи.

Химический состав сплава ВТ20Л (ТУ 1-92-184-91) и состав полученного слитка, по которому производился расчет теплофизических свойств сплава в программе «ProCast», приведены в таблице 2.

Таблица 2 – 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					
						0,3	0,15	0,15	0,05	0,13	0,01

Несмотря на то, что сплав ВТ20Л известен с 1965 г., данные о его теплофизических свойствах достаточно разноречивы и не полны. В связи с этим по химическому составу полученного сплава был произведен расчет значений теплопроводности, энтальпии и плотности в зависимости от температуры в программе ProCast. Расчётные данные, полученные для сплава ВТ20Л, и литературные данные для сплава системы Ti-6Al-4V представлены на рисунке 3.

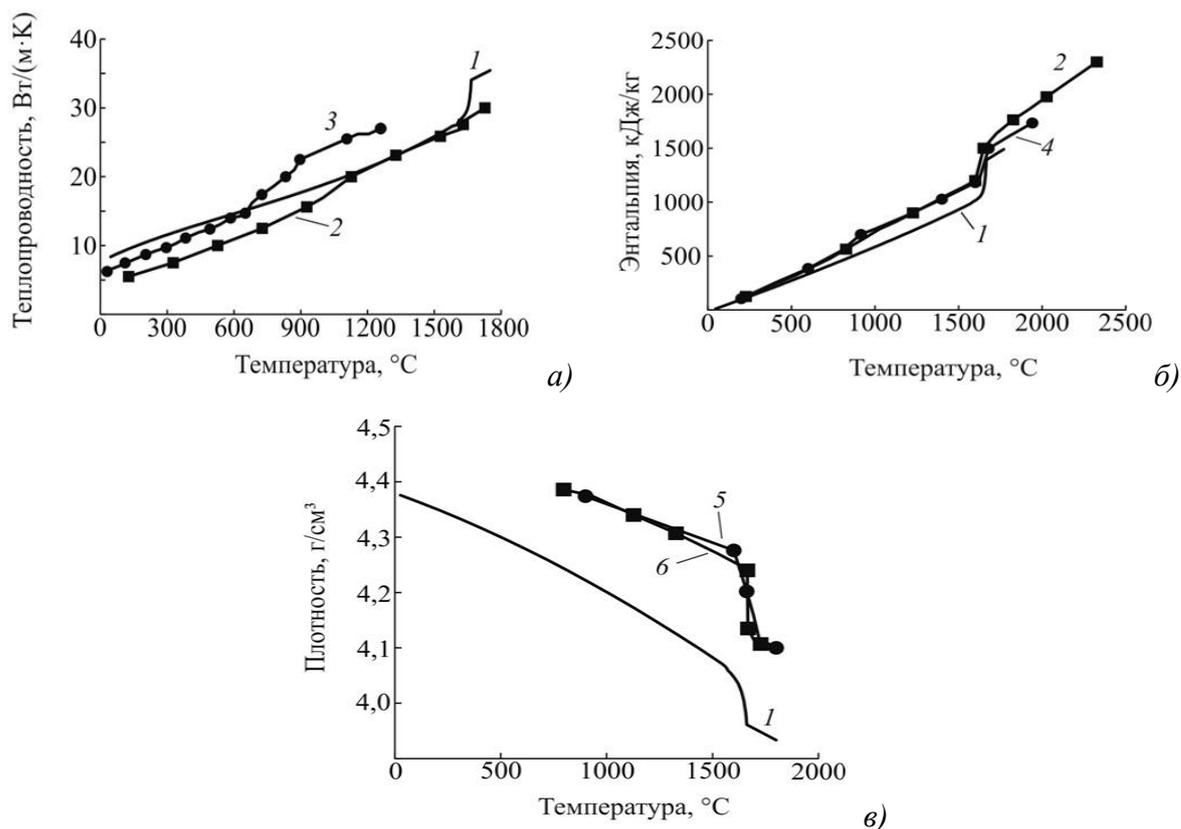


Рисунок 3 – Теплопроводность (а), энтальпия (б) и плотность (в) титановых сплавов ВТ20Л (1) и Ti-6Al-4V (2-6) в зависимости от температуры:

1– ProCast; 2,3,4,5,6 – литературные источники.

В целом разница между расчётными значениями и представленными в различных литературных источниках не превышает 20 %.

Для моделирования из литературных источников и базы данных программы ProCast были выбраны теплофизические свойства графита МПГ-6, так как по своим характеристикам он мало чем отличается от графита ГМЗ.

Значение коэффициента теплопередачи при моделировании процесса заливки и затвердевания отливки задавали в виде зависимости от температуры. Вначале в процессе заливки происходит интенсивное охлаждение отливки. Температура снижается до 300 °C, а далее происходит её медленное остывание.

По результатам расчетов был построен график зависимости коэффициента теплопередачи от температуры поверхности отливки, представленный на рисунке 4. Установили, что при температурах расплава от начала заливки (2000 °С) до температуры ликвидуса титанового сплава коэффициент теплопередачи растет. Максимальная величина h составила 530 Вт/(м²·К) при температуре ликвидуса сплава. После того, как образовалась твердая корка между расплавом и формой, h резко упал до 70 Вт/(м²·К). Между отливкой и формой образовался зазор, и теплопередача далее идет в основном излучением. Величина коэффициента теплопередачи продолжает снижаться вместе с температурой отливки. Среднее значение функции ошибок составило 16,9 °С.

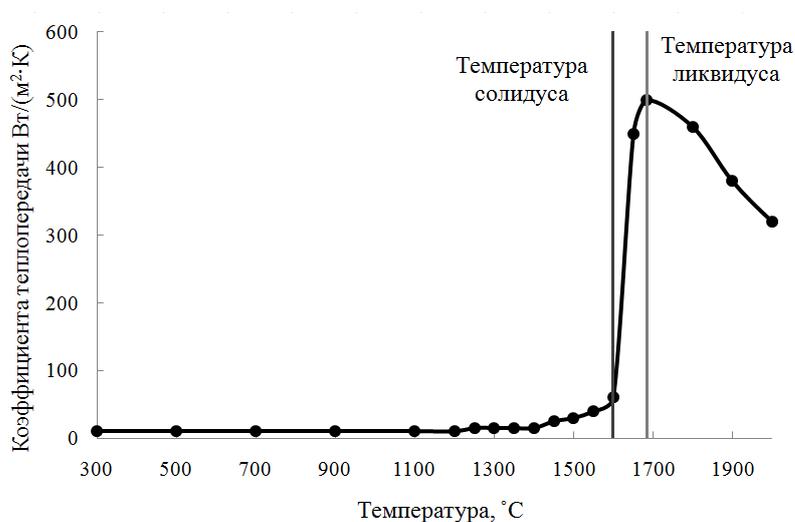


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента теплопередачи от температуры поверхности отливки при литье сплава ВТ20Л в графитовую форму

Результаты исследования жидкотекучести сплава ВТ20Л при стационарной заливке форм представлены в таблице 3. 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 3- 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 из литературных источников для сплава ВТ21Л, так как эти сплавы обладают схожим химическим составом. Эта разница объясняется тем, что при незначительном отличии по теплоаккумулирующей способности графита и стали первый материал обладает более высокой теплопроводностью (рисунок 5).

Графит обеспечивает более интенсивный теплоотвод, и при этом значительно снижается жидкотекучесть. Вследствие невозможности использования температурных параметров расплава и формы для её повышения появляется необходимость применения высоких скоростей вращения центробежного стола заливочной печи (200–400 об/мин). Такие скорости значительно повышают заполняемость металлом полости литейной формы и способствуют образованию более равномерной структуры по сечению отливки.

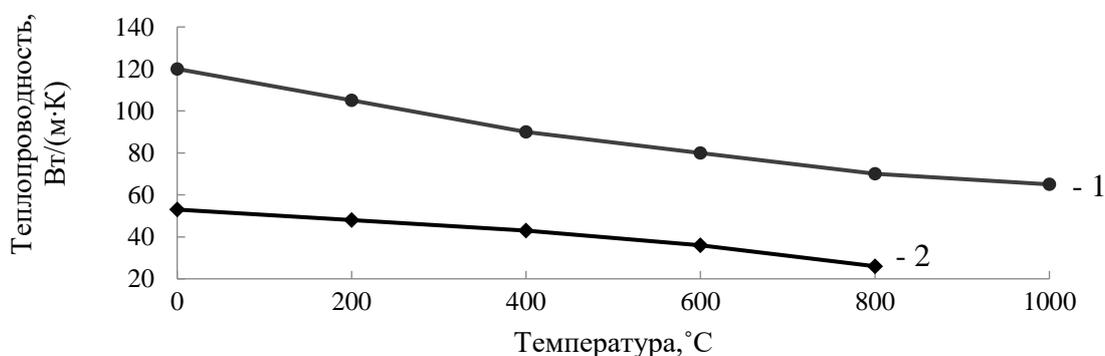


Рисунок 5 – Теплопроводность в зависимости от температуры графита МПГ-6 (1) и стали 15 (2)

При помощи экспериментально полученных и литературных данных была построена литниковая система и проведено моделирование процесса заполнения расплавом ВТ20Л полости литейной графитовой формы и затвердевания отливок «Стойка». Результаты представлены на рисунке 6. Закрашены незаполненные расплавом области.

В результате проведённого моделирования установлено, что достаточным числом оборотов (n) для вращения формы является 300 об/мин. При этом заполнение полости литейной формы происходит равномерно, сплошным фронтом движущегося потока, и недоливы отсутствуют.

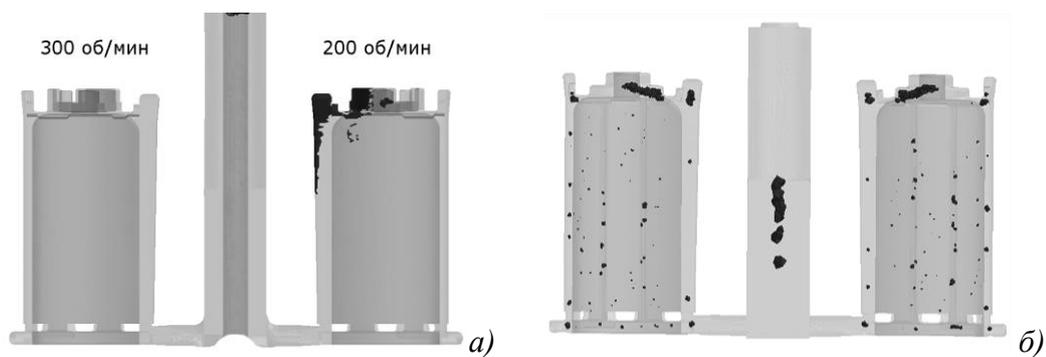


Рисунок 6 – Результаты моделирования процесса заполнения отливки «Стойка» сплавом VT20Л: а) заполнение формы расплавом в зависимости от частоты вращения центробежного стола; б) усадочная пористость.

Также, используя полученные данные, разработали литниковую систему и выполнили аналогичный процесс моделирования применительно к отливке «Втулка». В расчетах использовали максимальную скорость вращения центробежного стола плавильной установки ALD VAR 1500SM-Ti» на ПАО «ОДК-УМПО» – 100 об/мин. Результаты моделирования для отливки «Втулка», показанные на рисунках 7, 8, свидетельствуют о том, что наиболее проблемные с точки зрения заполнения и плотности протяженные, тонкие плоскостные и конические элементы отливки оформлены полностью без каких-либо внешних дефектов. Большая часть рассеянной пористости, наблюдаемой в стенках и других участках отливки, имеет размеры, устранимые последующей газостатической обработкой.

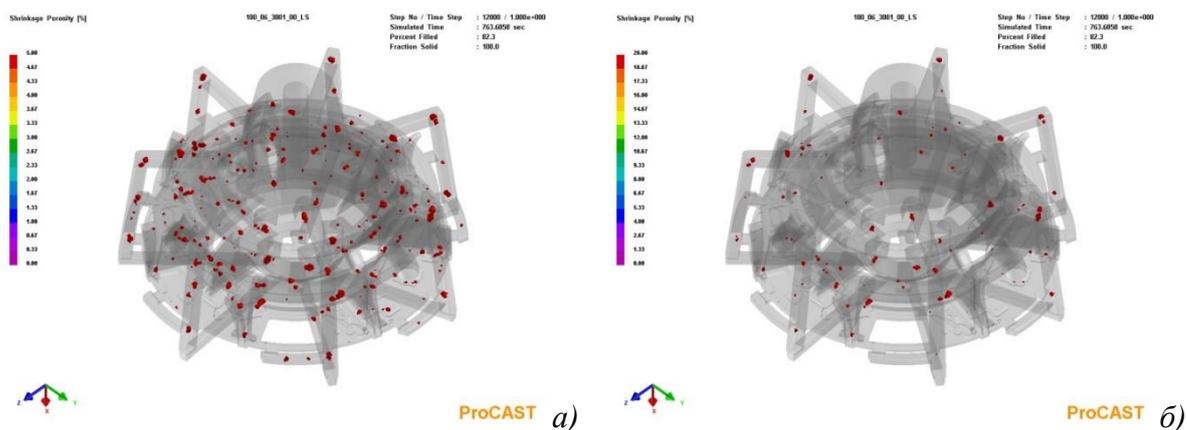


Рисунок 7 – Распределение усадочной пористости в результате моделирования отливки «Втулка» а) более 5% б) более 20%

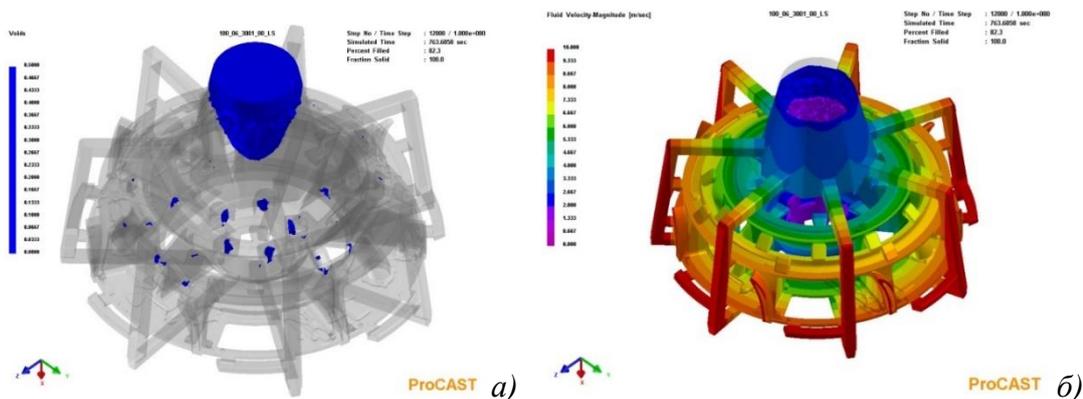


Рисунок 8 – Результаты моделирования отливки «Втулка»: а) усадочные раковины в отливке; б) распределение скорости заполнения

Установлено, что элементы литейных форм, полученные после механической обработки графита марок ГЭ и ГМЗ, обладают высоким качеством поверхности. Значения шероховатости Ra варьируются от 3,5 до 5,7 мкм.

Элементы литейных форм после изготовления собрались воедино. Для соединения и ремонта некоторых из них использовался клей I (Г42П32С26), содержащий 42 % графита, 32 % пульвербакелита и 26 % спирта (% масс.). Выбор данного клея обусловлен прочностью его клеевого соединения при температуре отверждения 200 °С, которая составляет $10,0 \pm 1,3$ МПа.

Разрезы литейной формы для отливок «Втулка» и «Стойка» представлены на рисунке 9.

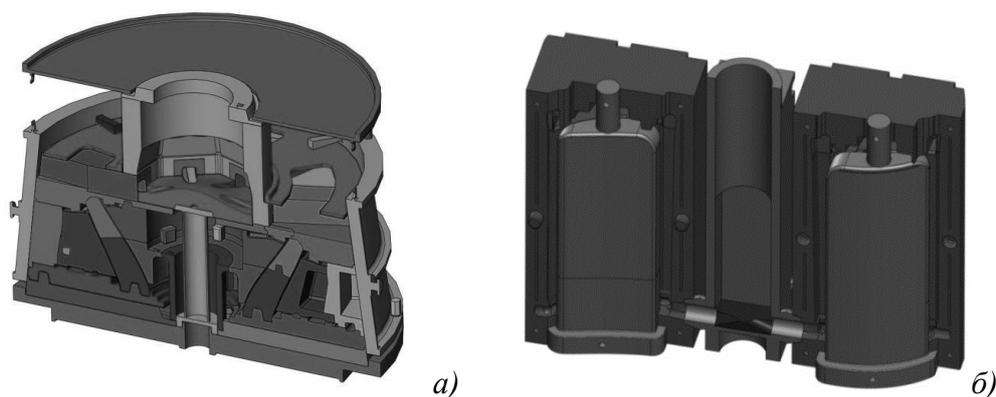


Рисунок 9 – Вид литейной формы а) для отливки «Втулка» в разрезе (б) для отливки «Стойки» по плоскости разъема

В четвертой главе представлены результаты изготовления опытных отливок и исследования их взаимодействия с формой.

После заливки металла в форму и последующего охлаждения производилась выбивка отливок и анализ шероховатости их поверхностного слоя. Исследования проводились на отливке «Втулка» (рисунок 10 (а)), так как её изготовление осуществлялось в более «жёстких» условиях взаимодействия металл-форма по сравнению с отливкой «Стойка» (рисунок 10(б)): более чем в 2,0 раза больше расход металла на изготовление одной отливки. 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.



Рисунок 10 – Отливки из сплава ВТ20Л а) «Втулка» б) «Стойка»

На отливке «Втулка» были выбраны участки-представители для определения количества металла, которое «пройдет» через них. Часть поверхностей для проведения измерений располагается на формообразующих участках литниковой системы по уменьшению сечения (А, Б и В), а другая часть - на формообразующих поверхностях проливной и закрытой прибылей (Д и Г).

В результате проведенного анализа определили, что с уменьшением количества металла, прошедшего через сечение полости формы, то есть проконтактировавшего с её поверхностью, наблюдается уменьшение шероховатости отливки (рисунок 11). 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 которую прошло минимальное количество металла, равное $0,3 \text{ г/мм}^2$, шероховатость равна $1,34 \text{ мкм}$.

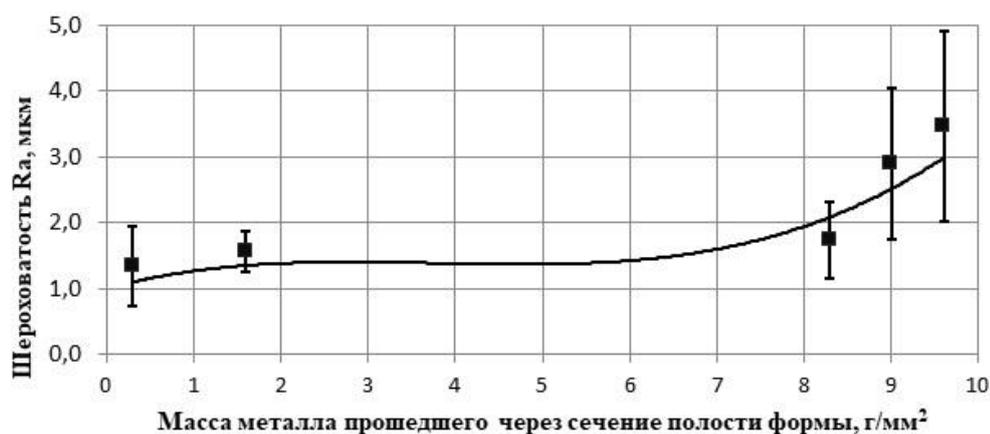


Рисунок 11 – Зависимость шероховатости поверхности отливки от количества металла, прошедшего через сечение полости формы

Анализ полученных результатов позволил вывести математическую формулу (2) для расчета шероховатости поверхности отливки (y) в зависимости от количества металла, прошедшего через сечение полости литейной формы (x):

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

где y - значение шероховатости поверхности R_a , мкм;

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

Микроструктура сплава ВТ20Л, химический состав которого соответствует требованиям ТУ 1–92–184–91, на разных участках отливки «Втулка» представлена на рисунке 12. В результате анализа микроструктуры сплава на шлифах не было обнаружено изменений в его структуре 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. А так как в качестве материала формы используется графит высокой чистоты, содержание зол у которого не более 0,03 % масс., альфированный слой не образовывается.

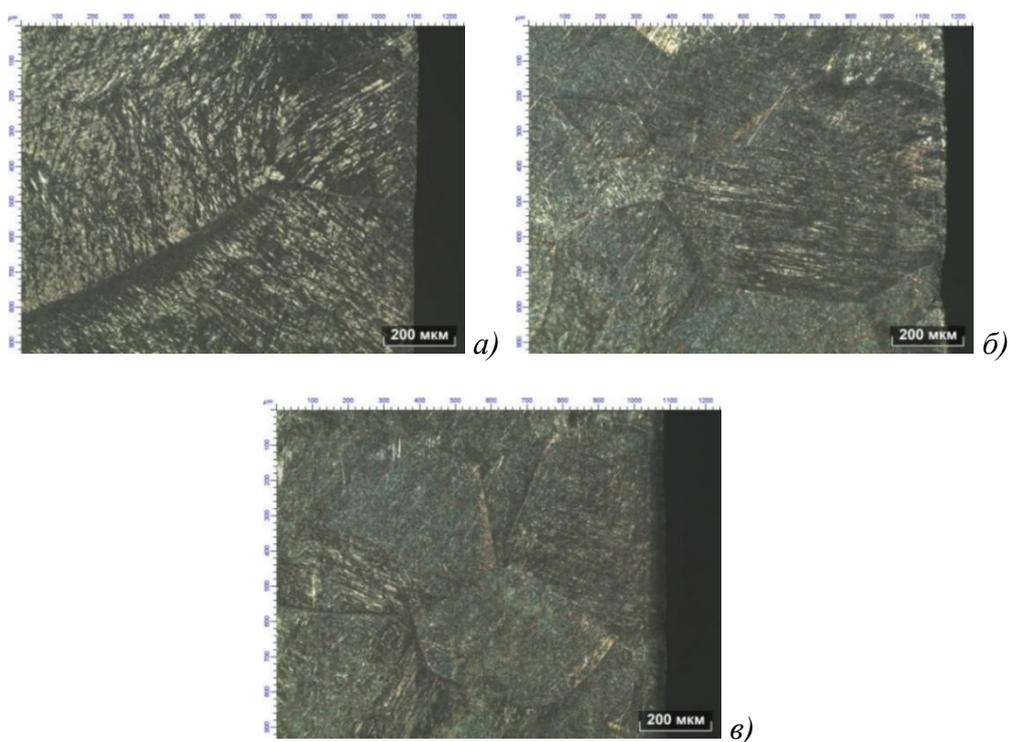


Рисунок 12 – Микроструктура образцов, вырезанных из отливки «Втулка» из сплава VT20Л: (а) участок А, (б) участок Б, (в) участок В. Оптическая микроскопия.

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.

Механические свойства сплава VT20Л, полученные в ходе проведённых исследований, сравнили с экспериментальными и литературными данными для различных способов литья. 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 VT20Л 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.

В пятой главе представлены результаты определения размерной точности опытных отливок («Втулка» и «Стойка»), которую позволяет получать метод литья по безмодельной технологии.

При изготовлении формы для отливки «Стойка» была заложена максимальная линейная усадка 1,2 %. Отклонения размеров для этой отливки не превышают 1 мм. Для отливки «Втулка» величина усадки была снижена до 0,7 %. Следует отметить, что габаритные размеры отливки «Втулка» значительно превышают размеры отливки «Стойка», и она значительно сложнее, поэтому дальнейший анализ размерной точности изготовления производили на примере этой отливки. Из результатов оцифровки отливки «Втулка» определили, что отклонения размеров не превышают двух миллиметров.

Для того, чтобы количественно оценить отклонения размеров и вычислить величину реальной линейной усадки отливки при данном способе литья, были определены размеры А—G, обозначенные на вертикальном и горизонтальном сечениях отливки «Втулка» (рисунок 13).

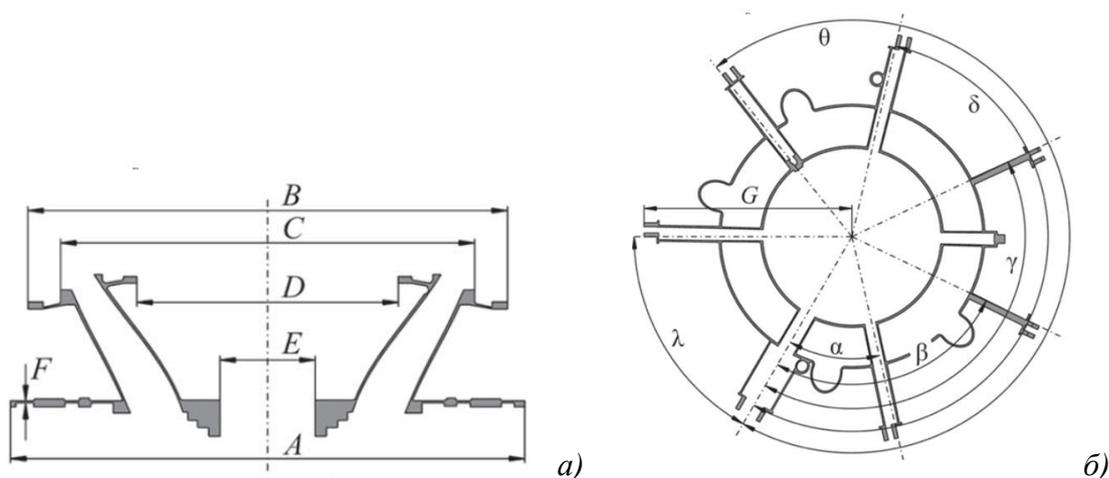


Рисунок 13– Сечения модели отливки «Втулка» с размерами, которые измеряли в отливке а) вертикальное б) горизонтальное

Для внешних диаметров (А, В, С) отливки отклонение размеров составили 0,9—1,5 мм. При этом для наибольшего диаметра А величина усадки равна 0,62%, что меньше заданной при проектировании формы (0,7%), а для двух других внешних диаметров - 0,82 и 0,86%, что больше её заданных значений при проектировании. Величина усадки для внутренних диаметров D и E составила 0,35% и 2,5%, соответственно. При разработке технологии литья в графитовые формы следует учитывать возможное отсутствие усадки на внутренних диаметрах, оформляемых единым стержнем. Поэтому необходимы

дополнительные инженерные решения, позволяющие обеспечить усадку сплава. В качестве других материалов можно использовать графиты марки ПГ-50 и МНГ, так как они обладают гораздо более низкими прочностными характеристиками. Эти графиты содержат в своем составе большее количество примесей (золы) 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.

Размеры G на рисунке 25 — это расстояния между центральной осью отливки и местами для приварки отливок «Стойка». Среднее отклонение этого размера от математической модели составило 0,5 мм, а величина усадки - 0,78%.

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. Способ литья по безмодельной технологии позволяет получать отливки с габаритными размерами, ограничиваемыми лишь габаритами заливочной камеры литейной установки, а при использовании податливых стержней - в соответствии с шестым классом размерной точности (ГОСТ Р 53464–2009).

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 % пульвербакелита 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 (Ra) составляет 1,34...3,46 мкм, что полностью соответствует требованиям

конструкторской документации, предъявляемым к литым титановым деталям. Выведена математическая формула (1), 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, который снижает 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) в следствии высокой размерной точности (6 класс ГОСТ Р 53464-2009), низкой шероховатости поверхности (Ra 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.

Основные результаты научного доклада представлены в публикациях:

1. Bazhenov V. E., Fadeev A.V., Kolygin 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, 2019. - С.84-99;

9. Исследование жидкотекучести титанового сплава BT20Л / А. Ю. Качалов, В. Д. Белов, В. Е. Баженов, А. В. Фадеев // Прогрессивные литейные технологии: Труды X Международной научно-технической конференции, Москва, 09–13 ноября 2020 года. - Москва: Издательство "Маска", 2020. - С. 133–138;

10. Определение коэффициента теплопередачи между отливкой из титанового сплава и графитовой формой / А. Ю. Качалов, В. Д. Белов, В. Е. Баженов [и др.] // Прогрессивные литейные технологии: Труды X Международной научно-технической конференции, Москва, 09–13 ноября 2020 года. - Москва: Издательство "Маска", 2020. - С. 138–142.