

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Институт новых материалов и технологий
Кафедра «Литейное производство и упрочняющие технологии»

На правах рукописи

МАРТЫНЕНКО Сергей Витальевич

**Совершенствование технологии изготовления
крупногабаритных тонкостенных стальных отливок
с применением уточненной по свойствам материалов
компьютерной модели**

2.6.3. Литейное производство

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Огородникова Ольга Михайловна

Екатеринбург – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА	11
1.1 Проблематика технологий литья и обеспечения качества крупногабаритных тонкостенных стальных отливок	11
1.2 Проблематика компьютерного моделирования крупногабаритных отливок и технологий литья в песчаные формы	19
1.3 Проблематика баз данных материалов в САПР литейной оснастки и технологии изготовления литых заготовок	25
Глава 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	31
2.1 Обоснование выбора САПР литейной технологии LVMFlow	31
2.2 Свойства литейной стали для изготовления крупногабаритных тонкостенных отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная».....	33
Глава 3. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД КОРРЕКТИРОВКИ БАЗЫ ДАННЫХ ФОРМОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	42
3.1 Характеристики формовочных материалов, применяемых в литейном производстве УВЗ.....	42
3.2 Экспериментальная база для корректировки теплофизических свойств формовочных материалов.....	50
3.2.1 Эксперимент по определению теплофизических свойств формовочной смеси для цилиндрической тестовой отливки	51
3.2.2 Эксперимент по уточнению теплофизических свойств материала формы для крупногабаритной отливки.....	53
3.3 Расчетная часть метода	56
3.3.1 Разработка математического и программного обеспечения расчетной части метода САПР литейной оснастки и технологии изготовления крупногабаритных отливок в песчаных формах	56
3.3.2 Верификация расчетной части метода	60
3.3.3 Восстановление свойств материала формы с использованием экспериментальных данных	62
3.4 Выводы по главе 3	65
Глава 4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ.....	66
4.1 Компьютерная модель технологии изготовления крупногабаритной тонкостенной стальной отливки.....	66
4.2 Влияние технологических условий на образование дефектов в крупногабаритных тонкостенных стальных отливках.....	71

4.2.1 Влияние свойств материала формы на точность прогнозирования усадочных дефектов	71
4.2.2 Влияние параметров заливки на время заполнения расплавом формы.....	73
4.2.3 Влияние литниковой системы на процесс заполнения формы расплавом	77
4.3 Выводы по главе 4	82
Глава 5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК «РАМА БОКОВАЯ» И «БАЛКА НАДРЕССОРНАЯ»	83
5.1 Технологические особенности исходного способа изготовления крупногабаритных вагонных отливок	83
5.2 Разработка и исследование новых конструкций стержней-вставок для литейных прибылей	91
5.3 Совершенствование технологии изготовления отливки «Рама боковая»	100
5.3.1 Дефекты в отливке «Рама боковая» при изготовлении по исходной технологии	100
5.3.2 Выбор литниковой системы	105
5.3.3 Выбор прибылей.....	113
5.3.4 Выбор холодильников	118
5.3.5 Применение технологических ребер и устранение трещин	122
5.3.6 Совместная работа технолога и конструктора по изменению конструкции литой детали	123
5.3.7 Результаты исследований по совершенствованию технологии изготовления отливки «Рама боковая»	124
5.4 Совершенствование технологии изготовления отливки «Балка надрессорная» ...	126
5.4.1 Усадочные дефекты в исходной технологии изготовления отливки «Балка надрессорная».....	126
5.4.2 Влияние конструкционных размеров на усадочную пористость.....	129
5.4.3 Устранение усадочных дефектов в отливке «Балка надрессорная»	130
5.5 Выводы по главе 5	133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	137
Приложение П1. Распечатка рабочего окна MatLab с верификацией расчетной части разработанного метода	150
Приложение П2. Интерфейсные окна разработанной программы	159
Приложение П3. Акт внедрения	160

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертационной работы определяется стратегической важностью литых деталей грузовых вагонов. В их числе следует особо выделить крупногабаритные тонкостенные детали тележек грузовых вагонов, а именно, – раму боковую и балку надрессорную, которые являются наиболее ответственными деталями грузового подвижного состава, и в то же время – наиболее сложными и трудоемкими с точки зрения реализации технологий литья и технико-экономической организации литейного производства.

Стратегия развития железнодорожного транспорта до 2030 года предусматривает приведение уровня качества и безопасности перевозок в соответствие с требованиями Российской Федерации и лучшими мировыми стандартами на основе технологического и технического развития отрасли. В связи с этим инициировано производство грузового подвижного состава нового поколения с улучшенными техническими характеристиками. В частности, планируется увеличение нагрузки на ось до 27-30 тонно-сил, снижение тары грузового вагона на 25 процентов, а также возможность эксплуатации вагонов на скорости до 140 км/час. Соответственно, повышаются требования к надежности литых деталей и качеству крупногабаритных тонкостенных стальных отливок, что актуализирует вопросы совершенствования технологий их изготовления.

В настоящее время обеспечение повышенных показателей по качеству отливок становится труднодостижимой задачей без применения средств компьютерного моделирования. Быстрое развитие специализированных систем компьютерного моделирования и автоматизированного проектирования (САПР) технологий литья позволяет ставить и решать совершенно новые задачи в области литейного производства, а также реализовывать новые технологические разработки, высокая сложность которых ограничивала ранее их экспериментальную проверку в производственных условиях из-за больших сопутствующих затрат.

Достоверность результатов компьютерного моделирования литейных технологий лимитируется неполными базами данных материалов, поставляемыми вместе с САПР. Так, универсальные базы не содержат необходимые данные о формовочных материалах, состав и теплофизические свойства которых для различных литейных производств индивидуальны. Поэтому возникает вопрос о корректировке баз данных для компьютерного моделирования литейных технологий с учетом производственных условий конкретного литейного цеха.

Таким образом, вопросы разработки метода корректировки теплофизических свойств формовочных материалов, направленные на повышение точности компьютерных моделей и достоверности прогнозирования литейных дефектов при проектировании и совершенствовании технологий изготовления вагонных стальных отливок, обуславливают актуальность темы диссертационного исследования в области литейного производства.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время большое внимание уделяется практическому применению программ для разработки технологий литья. Преобладающая часть исследовательских работ выполняется отечественными учеными с использованием зарубежного программного обеспечения. Вместе с тем, значительный вклад в теорию стального литья и математическое моделирование теплофизических процессов в литейной форме, включая процессы образования усадочных дефектов, внесли такие известные российские ученые, как Г. Ф. Баландин, Б. А. Баум, П. П. Берг, П. Н. Бидуля, П. Ф. Василевский, А. И. Вейник, Н. Г. Гиршович, А. А. Горшков, В. Г. Грузин, Л. Я. Козлов, В. В. Назаратин, Ю. А. Нехендзи, Н. И. Рубцов, Ю. А. Степанов, В. В. Ширяев и другие. Применение разработанных теоретических положений к компьютерному моделированию крупногабаритных тонкостенных стальных отливок со сложной пространственной геометрией в полной мере не реализовано.

Цель работы: разработка и проверка в заводских условиях расчетно-экспериментального метода корректировки теплофизических свойств

формовочных смесей как входных данных для более точного моделирования литейных технологий с применением САПР, позволяющего совершенствовать технологии изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок и повысить их качество, исключив образование недопустимых литейных дефектов. В ходе выполнения исследовательской работы основное внимание было уделено **решению следующих задач:**

1. Разработать расчетно-экспериментальный метод корректировки базы данных формовочных материалов для компьютерного моделирования технологий изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок способом литья в песчаные формы.

2. С использованием разработанного метода настроить и верифицировать в программной среде отечественной САПР литейной технологии компьютерную модель процессов формирования усадочных дефектов в крупногабаритных тонкостенных стальных отливках, наполненную уточненными входными данными по свойствам материалов.

3. С применением уточненной компьютерной модели провести вычислительные эксперименты и изучить условия образования дефектов в крупногабаритных тонкостенных стальных отливках «Рама боковая» и «Балка надрессорная».

4. С учетом результатов компьютерного моделирования усовершенствовать и апробировать в условиях производства технологию изготовления отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная».

Область исследования диссертационной работы соответствует пункту 5 паспорта специальности («Разработка метода САПР литейной оснастки и технологии изготовления литых заготовок»), а также пункту 4 («Исследование литейных технологий для их обоснования и оптимизации»).

Научная новизна диссертационной работы определяется *впервые* полученными результатами исследований:

1. Разработан метод САПР литейной оснастки и технологии изготовления литых заготовок, который заключается в корректировке базы данных теплофизических свойств формовочных материалов для уточненного

моделирования температурных полей при затвердевании крупногабаритной отливки в песчаной форме. Математическое обеспечение разработанного метода отличается использованием эффективного алгоритма многопараметрической оптимизации, применяемого в технологиях искусственного интеллекта для быстрого обучения нейронных сетей на больших базах данных. Экспериментальная часть разработанного метода отличается фиксацией температурных кривых при затвердевании крупногабаритной отливки в цеховых условиях. Разработанный метод реализован в виде автономного программного модуля.

2. С использованием разработанного метода определены зависимости теплофизических свойств формовочных смесей (теплопроводности, удельной теплоемкости) в температурном интервале 20-1600°C, которые дополняют базу данных материалов программы LVMFlow и уточняют компьютерную модель процессов затвердевания крупногабаритной тонкостенной отливки из стали 20ГЛ в песчаной форме в условиях серийного производства УВЗ. Определенные расчетно-экспериментальным методом температурные зависимости свойств отличаются тем, что включают неучтенные существующими математическими моделями эффекты неоднородного изменения структуры и состава формовочной смеси по объему массивной песчаной формы.

3. В вычислительных экспериментах с использованием уточненной компьютерной модели изучено влияние геометрии экзотермических стержней-вставок на температурное поле и выявлена оптимальная геометрия, которая повышает эффективность работы закрытых прибылей за счет предотвращения преждевременного образования литой корки и концентрации усадочных дефектов в прибыли. Вставки с оптимальной геометрией отличаются от применяемых ранее осесимметричных вставок наличием от трех до пяти граней в погружной части, формирующих неравномерное по градиенту температурное поле.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что на базе отечественной САПР литейной технологии LVMFlow и разработанного

метода корректировки входных данных по материалам литейной формы, уточняющих нелинейные коэффициенты уравнения теплопроводности, сформирована среда проектирования технологий изготовления крупногабаритных тонкостенных отливок из стали 20ГЛ способом литья в песчаные формы. Разработанный расчетно-экспериментальный метод носит общий характер и не имеет ограничений по типу литейных сплавов, материалов и технологий.

Практическая значимость работы заключается в том, что с использованием сформированной среды проектирования и результатов вычислительных экспериментов усовершенствованы технологии изготовления отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная» способом литья в песчано-глинистую форму. Разработана конструкция экзотермических литейных стержней, защищенная патентами РФ на промышленный образец и патентами РФ на полезную модель; применение разработанных стержней в технологии изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок из стали 20ГЛ повышает эффективность работы прибылей и снижает уровень усадочных дефектов в отливке. Внедрение усовершенствованных технологий в цехе крупного стального литья УВЗ (г. Нижний Тагил) привело к снижению брака по отливкам «Рама боковая» и «Балка надрессорная» на 12 % с экономическим эффектом 161.35 миллионов рублей, что подтверждается актом внедрения.

Методология и методы диссертационного исследования охватывают натурные и вычислительные эксперименты, которые включают математическое моделирование, программирование, компьютерную симуляцию с применением САПР литейной технологии LVMFlow; измерение температурных полей при затвердевании отливки термопарами в лабораторных и цеховых условиях; лабораторные испытания формовочных материалов на специально подготовленных образцах для определения теплофизических свойств.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод САПР литейной оснастки и технологии изготовления литых заготовок – расчетно-экспериментальный метод корректировки теплофизических характеристик формовочных смесей для компьютерного моделирования процессов затвердевания отливки в литейной форме.

2. Настроенная в программной среде LVMFlow и верифицированная в цеховых условиях УВЗ уточненная компьютерная модель процессов затвердевания крупногабаритных тонкостенных стальных отливок в песчаной форме.

3. Результаты компьютерного моделирования процессов затвердевания крупногабаритных тонкостенных стальных отливок в песчаной форме, показывающие влияние геометрических параметров и способов размещения литниково-питающей системы на формирование усадочных дефектов.

4. Разработанные и внедренные в литейном производстве УВЗ усовершенствованные технологии изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная».

Степень достоверности и апробация результатов работы.

Достоверность результатов вычислительных экспериментов подтверждается выполнением верифицирующих натурных экспериментов. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, в том числе 6 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science. В процессе выполнения диссертационной работы получено 9 патентов РФ; запатентованные компоненты технологической оснастки используются в условиях УВЗ при производстве крупногабаритных тонкостенных стальных отливок.

Результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на российских и международных конференциях: VII международная научно-практическая конференция «ИТ-Бизнес-Металл», г. Москва, 2005; II международная научно-практическая конференция «Металлургия для машиностроения», г. Нижний Тагил, 2006; 4-ая Российская научно-

техническая конференция «Компьютерный инженерный анализ», г. Челябинск, 2007; IV Российская научно-техническая конференция «Ресурс и диагностика материалов и конструкций», г. Екатеринбург, 2009; XI Съезд литейщиков России, г. Екатеринбург, 2013; Научно-практическая конференция АО «НПК «Уралвагонзавод», г. Нижний Тагил, 2017; XII научно-промышленный форум «Техническое перевооружение машиностроительных предприятий России», г. Екатеринбург, 2017; Расширенное выездное заседание Секции литейщиков при Совете главных конструкторов Свердловской области, г. Асбест, 2018, The International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTME 2020), г. Севастополь, 2020.

Личный вклад автора. Автором лично проведены натурные эксперименты в цеховых условиях и симуляции технологий литья, созданы компьютерные модели технологий изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок. Совместно с заводскими технологами усовершенствованы соответствующие технологии, что обеспечило повышение качества отливок «Рама боковая» и «Балка адрессорная», производимых в литейных цехах УВЗ. Совместно с разработчиками программного обеспечения LVMFlow (МКМ, г. Ижевск) разработаны осесимметричные тестовые отливки и схемы измерения температурных полей при их затвердевании. Совместно с руководителем диссертационной работы внедрено программное обеспечение LVMFlow в конструкторском бюро литейной оснастки УВЗ, разработана и верифицирована расчетная часть метода для корректировки теплофизических свойств формовочных материалов, написаны статьи по теме диссертационного исследования.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

1.1 Проблематика технологий литья и обеспечения качества крупногабаритных тонкостенных стальных отливок

В соответствии с реализуемой в настоящее время стратегией развития транспортного машиностроения Российской Федерации до 2030 года [1] ужесточаются критерии и требования к грузовым вагонам, усиливается контроль качества производимого железнодорожного подвижного состава на машиностроительных предприятиях. Отдельное внимание в правительственных документах уделяется крупным стальным литым изделиям «Рама боковая» и «Балка надрессорная», которые являются наиболее ответственными несущими деталями тележек грузовых вагонов.

Излом литых боковых рам является одной из причин аварий на железной дороге не только в России, но и за рубежом [2]. На рисунке 1.1 представлен зафиксированный случай такой аварии в США. Исследование ряда аварийных ситуаций показало наличие усадочной пористости на поверхности разрушения литых деталей тележек грузовых вагонов; в деталях обнаружены и другие литейные дефекты.



Рисунок 1.1 – Аварийная ситуация на железной дороге в США (а)
как результат разрушения литой боковой рамы (б)

При изготовлении отливок ответственного назначения, в частности, вагонных крупногабаритных тонкостенных отливок, большое внимание уделяется качеству и безопасности, гарантией которых является отсутствие литейных дефектов в критических сечениях. Качество вагонных стальных

отливок обуславливает долговечность и надежность грузовых вагонов [3, 4]. Усиливающиеся требования к качеству предусматривают, в частности, проведение 100%-ного неразрушающего контроля в тех зонах отливок, которые ранее не подвергались данному типу контроля. Вводятся также периодические разрушающие испытания с целью удостовериться в отсутствии дефектов в отливках.

Важным этапом в получении качественной отливки является разработка оптимальной технологии литья, которая исключает образование недопустимых литейных дефектов. Технические требования к отливкам рам и балок регламентируются межгосударственным стандартом ГОСТ 32400-2013 [5], где подробно описываются допустимые технологические дефекты. Производством таких отливок в России занимается несколько заводов, прошедших серьезную модернизацию: УВЗ (г. Нижний Тагил), ПО «Бежицкая сталь» (г. Брянск), Алтайвагон (г. Рубцовск), РМ Рейл ВКМ-Сталь (г. Саранск), Тихвинский вагоностроительный завод (г. Тихвин), Промтрактор-Промлит (г. Чебоксары), Балаково-Центролит (г. Балаково).

Все перечисленные заводы решают проблемы, связанные с качеством вагонных стальных отливок и совершенствованием технологии литья. Например, на заводе в Брянске при совершенствовании технологии была достигнута требуемая размерная точность отливок, но отмечались трудности с устранением дефектов типа газоусадочных трещин; на заводе в Рубцовске технологические приемы по обеспечению качественной пропитки тепловых узлов и отсутствию трещин газоусадочного происхождения привели к необходимости внесения изменений в конструкторский чертеж и введения технологических пополнений. В работе [6] обсуждаются дефекты отливок «Рама боковая» от разных производителей: неспай и недолив, волнистость и завороты, горячие трещины, усадочные дефекты, газовые раковины.

Следует отметить, что на текущий момент не определена эталонная технология с набором конкретного оборудования, удовлетворяющего всем предъявляемым требованиям. Производители оборудования также не могут

дать однозначного ответа на вопрос, какой способ формовки для данного типа отливок обеспечивает наилучшие технико-экономические показатели. Для изготовления крупногабаритных вагонных отливок применяются следующие технологии формовки: песчано-глинистая формовка с применением встряхивающих формовочных машин (УВЗ; ПО «Бежицкая сталь»); песчано-глинистая (бентонитовая) формовка с применением автоматических линий с прессованием (Алтайвагон; ПО «Бежицкая сталь»; Промтрактор-Промлит [7]); песчано-глинистая (бентонитовая) формовка с применением пескометного способа уплотнения (ЧКД-Кутна Гора, Чехия); ХТС формовка с применением технологии NO-BAKE (УВЗ); вакуумно-пленочная формовка (Промтрактор-Промлит [8]; Тихвинский вагоностроительный завод; РМ Рейл ВКМ-Сталь [9]). Все перечисленные технологии имеют преимущества и недостатки, а также свои особенности, которые проявляются в технологических процессах при заливке и кристаллизации стали.

В ответ на претензии по качеству литых деталей тележек грузовых вагонов и слабой работе отделов технического контроля на заводах-изготовителях со стороны заказчика ОАО «РЖД» [10] в литейном производстве УВЗ был принят ряд мер по исправлению ситуации. Так, в настоящее время выполняется постоянный анализ дефектов отливок, проводится ежедневная разбраковка, и если отливки не соответствуют установленным требованиям, они либо бракуется, либо подвергаются исправлению. Производство останавливается, когда каждая 500-я деталь по результатам разрушающих испытаний в критических сечениях не соответствует требованиям ГОСТ 32400-2013.

По результатам статистического анализа брака в цехе крупного стального литья УВЗ выявлено три лидирующих вида брака отливок, которые могут приводить к излому литых деталей [11] – песчаные раковины (засор), дефекты газоусадочного происхождения, недолив. Брак по засору – это брак, связанный с качеством изготовления литейных форм и стержней, который может также быть исправлен путем изменения литниково-питающей системы

и способа разливки. На наличие усадочных дефектов в отливках оказывают влияние следующие факторы: расположение отливки в форме, ее конфигурация и конструкция (наложение припусков и уклонов), наличие и местоположение прибылей, холодильников, а также параметры литниково-питающей системы (способ подвода металла и количество питателей). На наличие недоливов в отливках прежде всего влияют такие факторы, как литниково-питающая система, подготовка металла, точное соблюдение утвержденной технологии разливки. Ряд перечисленных проблем может быть решен путем совершенствования технологии литья.

При совершенствовании технологии литья следует учитывать, что отливки «Рама боковая» и «Балка надрессорная» относятся к классу крупногабаритных тонкостенных отливок [12], вес которых достигает нескольких сотен килограммов, толщина стенок составляет 15-20 мм при габаритных размерах около 2-3 метров (рисунок 1.2).



а



б

Рисунок 1.2 – Отливки «Рама боковая» (а) и «Балка надрессорная» (б) [12]

Важной частью совершенствования технологии является разработка литниковой системы. В технической и научной литературе приводятся формулы и примеры расчета литниковых систем для стальных отливок [13-22]. Следует отметить, что на производстве преимущественно проектируются технологии для изготовления толстостенных стальных отливок несложной геометрии без внутренних полостей. Такие отливки, как «Рама боковая» и «Балка надрессорная», являются наиболее сложным в изготовлении случаем стального литья из-за фасонной конфигурации, внутренних полостей и малой

по сравнению с габаритами толщиной стенки. Геометрические особенности отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная» требуют поиска новых подходов к выбору и расчету литниковых систем [23].

Литые заготовки рассматриваемых литых деталей изготавливаются из низколегированных сталей марок 20ГФЛ, 20ГЛ [24], 20ГТЛ (ГОСТ 32400-2013) различными методами гравитационного литья; наиболее распространенные из них: литье в песчано-глинистые формы; литье в формы по технологии вакуумно-пленочной формовки; литье в формы, изготовленные из холодно-твердеющих смесей, а также литье в формы из жидкостекольных смесей. Все реализованные варианты перечисленных технологий изготовления крупногабаритных литых деталей не могут обеспечивать такое качество, при котором в отливках полностью отсутствуют литейные дефекты: песчаные, шлаковые и газовые раковины, горячие трещины, усадочная пористость металла, неспаи, недоливы и другие. Усадочные дефекты остаются проблемой качества крупногабаритных тонкостенных стальных отливок на всех заводах-изготовителях.

При соблюдении на производстве требований ГОСТ 32400-2013 и технических требований чертежа гамма-процентный срок службы (календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью в соответствии с ГОСТ 27.002-89) рам и балок из сталей 20ГФЛ, 20ГЛ и 20ГТЛ составляет 32 года. Однако в эксплуатации имеют место случаи разрушения рам и балок с непродолжительным сроком службы: от 2-х до 23-х лет [25].

Преждевременное разрушение деталей происходит, в основном, по двум причинам: либо при возникновении в эксплуатации экстремального режима нагружения деталей тележек, либо при наличии литейных дефектов в зонах опасных сечений деталей, которые становятся очагами зарождения в них усталостных трещин даже при номинальных режимах силового нагружения. Экспериментально установлено [26], что предел выносливости бездефектных боковых рам при стендовых циклических испытаниях на 13% выше, чем тех

деталей, в изломах которых выявлены литейные дефекты, допустимые техническими условиями на их изготовление. Литейные дефекты в тестовых образцах снижают их долговечность вдвое и более по сравнению с бездефектными.

Анализ результатов стендовых испытаний боковых рам и надрессорных балок после их 30-летней эксплуатации показал, что после такого срока службы бездефектных деталей практически нет. Так, в боковых рамах 77 % всех разрушений произошло по внутреннему углу буксового проема, где от вертикальной нагрузки возникают наибольшие напряжения (90 МПа при осевой нагрузке 228 кН). Анализ изломов боковых рам и надрессорных балок после их усталостных испытаний подтверждает иницирующую роль литейных дефектов как концентраторов напряжений и очагов зарождения усталостных трещин. Наибольшую опасность представляют дефекты, образующиеся на поверхности или в подповерхностной зоне детали (до 2 мм от поверхности) [27]. Чаще всего это газовая или усадочная пористость, встречаются также песчаные раковины. Подобные дефекты достаточно сложно обнаружить неразрушающими методами. Как правило, они выявляются при проведении периодических испытаний, при разрушающем контроле порезкой или поломкой (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Отливка «Рама боковая» (а) и ее продольный порез (б) в ходе разрушающего контроля в заводских условиях УВЗ

На рисунках 1.4 и 1.5 показаны установленные зоны (сечения) разрушения боковых рам и надрессорных балок, в которых литейные дефекты не допускаются и подлежат сплошному контролю.

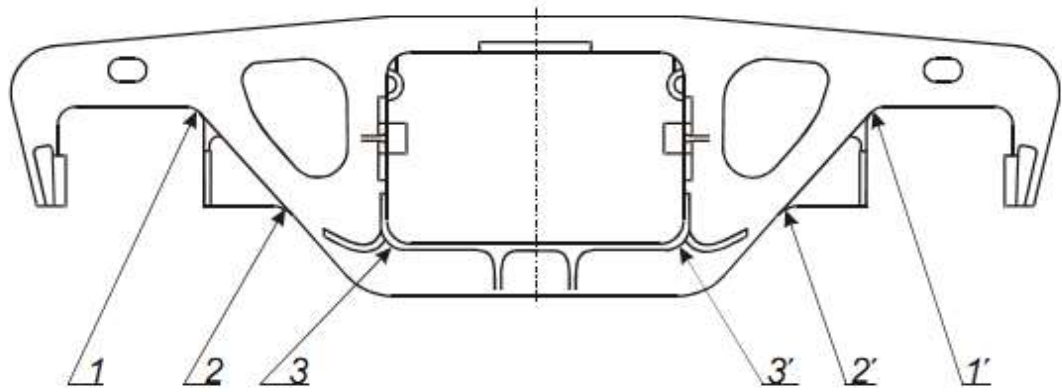


Рисунок 1.4 – Схема расположения сечений в боковой раме по зонам разрушения: 1 – сечение внутреннего угла буксового проема; 2 – сечение наклонного пояса за опорной площадкой; 3 – сечение рессорного проема

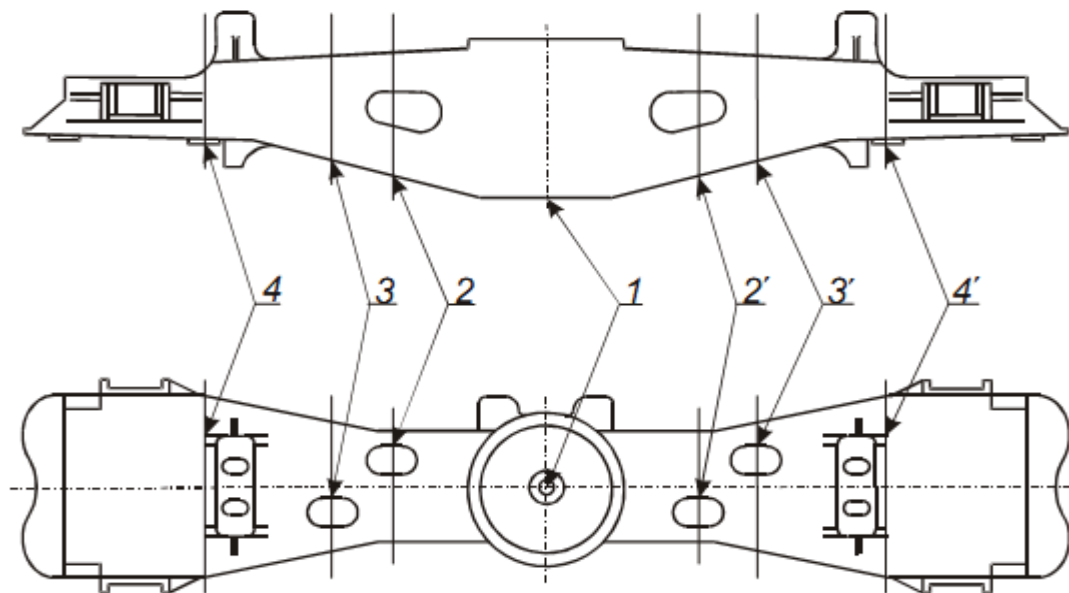


Рисунок 1.5 – Схема расположения сечений в надрессорной балке по зонам разрушения: 1 – шкворневое сечение; 2 – сечение по технологическому отверстию наклонного пояса; 3 – сечение наклонного пояса; 4 – сечение вблизи скользуна

Анализ результатов диагностирования с использованием феррозондового метода контроля боковых рам в количестве 19465 штук и надрессорных балок в количестве 9513 штук в период с 1997 по 2003 гг. при плановых ремонтах вагонов показал наличие трещин и литейных дефектов в контрольных зонах после эксплуатации деталей в течении 2,5 лет и более. Во всех случаях зарождение трещин происходит от литейных дефектов,

расположенных на поверхности детали или от внутренних дефектов, расположенных на расстоянии 1–2 мм от поверхности [28].

Проблематика совершенствования технологий литья крупногабаритных тонкостенных стальных отливок с целью обеспечения повышенного качества определяется прежде всего нетехнологичными конструктивными особенностями [29]: закрытые тепловые узлы, массивные приливы, резкие переходы от тонких сечений в стенках к массивным узлам, наличие коробчатых сечений.

Многолетний опыт производства крупногабаритных тонкостенных отливок из стали 20ГЛ в литейном производстве УВЗ позволяет сделать вывод, что основным направлением улучшения эксплуатационных характеристик вагонных стальных отливок является совершенствование технологических процессов за счет внедрения современных и экономически эффективных методов подготовки производства. К таким методам относится компьютерная симуляция технологии на этапе предпроизводственной подготовки. В частности, представляет интерес компьютерное исследование процессов формирования крупногабаритных тонкостенных стальных отливок с целью выявления закономерностей образования литейных дефектов, верификация соответствующих компьютерных моделей и разработка методов, позволяющих адаптировать коммерческие программы компьютерного моделирования литейных технологий к конкретным условиям производства данного типа отливок.

Применение методов компьютерного моделирования не только сокращает количество изготавливаемых и испытываемых натурных прототипов, вариантов конструкции и литниково-питающей системы, но и позволяет разрабатывать новые научные подходы к исследованию закономерностей формирования дефектов в отливках с целью их минимизации.

1.2 Проблематика компьютерного моделирования крупногабаритных отливок и технологий литья в песчаные формы

Компьютерное моделирование (Computer Aided Engineering – CAE) литейных технологий становится неотъемлемой частью проектирования и производства литых заготовок деталей машин [30] в интегрированных программных средах CAD/CAE/CAM [31].

Симуляция технологических процессов средствами CAE позволяет на ранних стадиях предпроизводственной подготовки выявлять возможные дефекты и своевременно вносить коррективы в цифровые модели проектируемых изделий с минимальными затратами ресурсов и времени [32]. Компьютерные методы исследования литейных процессов активно применяются для повышения качества отливок, а также для направленного поиска верных конструктивных решений при проектировании технологической оснастки [33].

В заводской практике используются как российские, так и зарубежные программы компьютерного инженерного анализа CAE в составе САПР литейной оснастки и технологии изготовления литых заготовок. В литературных источниках последнего периода приводятся результаты исследования литейных процессов с использованием известных зарубежных программ ProCast [34], Magma [35], WinCast [36], SolidCast [37]. Успешно используются технологами российские программы, соизмеримые по точности прогнозирования с зарубежными аналогами, – Полигон (г. Санкт-Петербург) [38, 39], LVMFlow (г. Ижевск) [40].

Следует отметить общие особенности моделирования литейных технологий с применением компьютерных программ. Анализ температурных полей и литейных дефектов проводится всеми перечисленными компьютерными программами в соответствии с однотипным алгоритмом – последовательно в трех функциональных модулях [41]. 1) В препроцессоре генерируется расчетная сетка. 2) В процессоре выбираются начальные и граничные условия; задаются свойства материалов; решаются на сетке

дифференциальные уравнения и вычисляются первичные параметры в узлах расчетной сетки – значения температуры. 3) В постпроцессоре массив расчетных результатов обрабатывается и представляется в графическом виде; просматриваются и анализируются вторичные расчетные характеристики – скорости и градиенты, пространственная локализация усадочных дефектов.

В программах моделирования литейных технологий используются различные численные методы вычисления температурных полей на расчетных сетках: метод конечных элементов (ProCast, WinCast, Полигон), метод конечных разностей (Magma, SolidCast, CastCAE), метод контрольных объемов (LVMFlow, Flow-3D [42]).

Сравнительный анализ [43] подтверждает, что все коммерческие программы, несмотря на различие применяемых методов, способны точно решать задачу о вычислении температурных полей при затвердевании отливки в форме, обладают удобным интерфейсом, сервисом и набором доступных функций. Опыт использования литейных программ на отечественных предприятиях показывает, что в большинстве случаев программы необходимы для решения задач, связанных с устранением грубых усадочных дефектов [44]. С этими задачами в настоящее время успешно справляются все известные коммерческие программы.

Ограничение на точность дискретного решения в компьютерном моделировании накладывается расчетной сеткой, размером элементарной ячейки и количеством расчетных узлов [45]. Для увеличения точности расчетов расстояние между расчетными узлами следует уменьшать, в то же время, чрезмерно большое количество расчетных узлов требует больших машинных ресурсов и затрат времени процессора на обработку данных. При генерации расчетной сетки приходится балансировать между этими противоположными факторами.

Особенности разработки или совершенствования технологии литья с использованием САПР определяются возможностью быстрого просмотра ошибочных конструктивных вариантов. Существует два подхода к

проектированию в программной среде. Первый способ отталкивается от отливки и проходит последовательно следующие этапы: анализ вариантов и выбор расположения отливки в форме без литниково-питающей системы с оценкой зон и объема усадки; добавление припусков, литейных уклонов, прибылей; анализ и выбор вариантов литниково-питающей системы, холодильников, стержней. Второй способ отталкивается от существующей проблемной технологии и включает исследование проблем с последующим усложнением конструкции, добавлением холодильников, технологических ребер и применением других мер с сопутствующим экспресс-анализом влияния изменений на дефекты в отливке [46].

Создание и настройка компьютерной модели для конкретной технологии литья и отливки сопровождается аналитической или экспериментальной проверкой промежуточных результатов – верификацией компьютерной модели [47]. Верификация направлена на совмещение значений температуры, вычисленных аналитически и с применением программы; либо на сравнение реальных и предсказанных программой усадочных раковин, засоров, трещин и других литейных дефектов.

Применение компьютерных инструментов для исследования качества отливок становится принципиально важным в случае больших габаритов, поскольку стоимость натуральных экспериментов и мероприятий по исправлению дефектов отливок достигает в этом случае запредельных величин с точки зрения экономической эффективности [48]. В литературных источниках присутствуют научные статьи, в которых обсуждаются результаты исследования крупногабаритных отливок с привлечением компьютерных программ. Так, в программе ProCast исследованы причины образования трещин в стальном слитке весом 6 тонн [49] и сегрегация элементов в стальном слитке весом 500 кг [50]. В программе Magma исследован процесс затвердевания отливки «Надпятник» железнодорожного назначения [51] весом 60 кг, с толщиной стенки 20 мм при габаритных размерах 600x400x400 мм. После компьютерного моделирования технологи сделали

закключение, что по данной отливке выход годного составлял 35% из-за применения 4-х прибылей на отливку и протяженной литниковой системы; соответственно, изменение технологии привело к увеличению выхода годного до 70%. Следует отметить, что в обсуждаемых работах компьютерному анализу подвергнуты отливки простой геометрической формы.

В случае сложной геометрии крупногабаритной отливки, при наличии тонких стенок, компьютерное исследование закономерностей формирования дефектов становится незаменимым средством обеспечения качества отливки. В последнее десятилетие в специализированных журналах появились публикации о компьютерном моделировании крупногабаритных стальных отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная» в связи с ростом аварий, вызванных разрушением литых вагонных деталей при эксплуатации в период с 2006 по 2012 гг [52].

В работе [53] для исследования процесса изготовления отливки «Балка надрессорная» вакуумно-пленочной формовкой использована программа Magma, но в статье не приводятся результаты прогнозирования усадочных дефектов и не обсуждаются закономерности их образования. В работе [54] для анализа температурных полей в отливке «Рама боковая» использована программа Flow-3D, отмечается влияние мест подвода питателей к отливке.

В работе [3] для анализа литейных дефектов в отливке «Рама боковая» использована программа ProCast; в статье показано распределение усадочных дефектов (рисунок 1.6), но правильность предложенных авторами рекомендаций по изменению технологии не подтверждена результатами компьютерного моделирования усовершенствованной технологии. В работе обсуждаются также особенности составления компьютерной модели с применением холодильников и экзотермических вставок; отмечается недостаточное наполнение базы данных материалов необходимыми теплофизическими свойствами вспомогательных материалов, в частности, — экзотермических вставок.

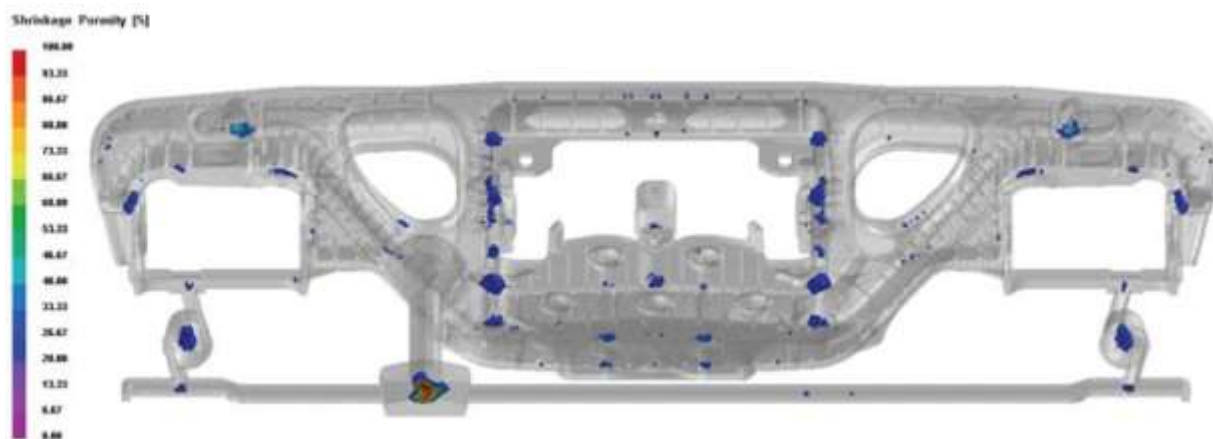


Рисунок 1.6 – Распределение усадочных дефектов в отливке «Рама боковая», выявленное моделированием в программе ProCast [3]

В работе [55] дается подробный анализ возможных причин образования горячих трещин в отливках «Рама боковая» и «Балка надрессорная», проведено компьютерное моделирование технологических решений проблемы с применением полых стержней, выявлена закономерность влияния толщины стенки стержня на уровень термических напряжений и скорость охлаждения отливки. Авторы отмечают отсутствие всех необходимых для расчета свойств материалов, особенно – механических свойств, тем не менее, полученные зависимости способствуют осознанному выбору конструктивных вариантов стержней.

В работе [56] для анализа усадочных дефектов в отливке «Рама боковая» использована программа SolidCast, даны рекомендации по установке прибылей, но не приводится подтверждение эффективности предложенных изменений.

Следует отметить, что авторы перечисленных статей не обсуждают вопросы достоверности использованных теплофизических свойств материалов как входных данных для компьютерного моделирования литейной технологии, их соответствие характеристикам фактически используемых на производстве материалов. В связи с этим у технолога, который не использует активно САПР литейной технологии, может сложиться впечатление, что коммерческая программа в 100% случаев дает правильный прогноз. Вместе с тем, из опыта тестирования программного обеспечения в КБ литейной

оснастки УВЗ выяснилось, что без адаптации компьютерных моделей к реальным цеховым условиям расчетные прогнозы подтверждаются при проверке фактических дефектов на 70-80 %. Выявление причин несовпадения расчетных прогнозов, выполненных в программах компьютерного моделирования литейных процессов, с фактически наблюдаемыми дефектами представляет интерес для дальнейшего развития и внедрения САПР литейной оснастки и технологии литых заготовок в повседневную производственную практику. Эффективные методы САПР позволяют технологам вести поиск наиболее простых и доступных технических решений, разрабатывать технологии с применением методов компьютерного моделирования с высокой степенью достоверности [57].

Особенностью компьютерного моделирования технологий литья в песчаные формы является необходимость учитывать и разделять влияние литейной формы на образование дефектов при заливке расплава в форму и в дальнейшем при затвердевании отливки в форме. Тепловые свойства формы определяют характер охлаждения отливки и ее качество. Вместе с тем, в опубликованных работах по компьютерному моделированию технологий литья в песчаные формы недостаточно внимания уделено исследованию процессов переноса тепла в форме, теплоотдачи, влияния интенсивности теплообмена на процесс охлаждения отливки.

Анализ работ, посвященных компьютерному моделированию литейных технологий, позволяет сделать вывод о том, что для всех коммерческих САПР литейной технологии общей является проблема комплектации базы данных материалов. При моделировании процессов литья в песчаные формы важно учитывать свойства тех материалов формы и стержней, которые используются на конкретном предприятии, что, в свою очередь, требует разработки методов корректировки и формирования необходимых данных.

1.3 Проблематика баз данных материалов в САПР литейной оснастки и технологии изготовления литых заготовок

Моделирование технологии и прогнозирование литейных дефектов в компьютерных программах базируется на решении численными методами нелинейного, нестационарного уравнения теплопроводности [58] вместе с граничными и начальными условиями на трехмерной расчетной сетке:

$$\nabla \cdot \lambda(T) \nabla T + \dot{q}(T) = \rho(T) c(T) \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1.1)$$

где $\lambda(T)$ – теплопроводность, $\dot{q}(T)$ – реализация скрытой теплоты фазового превращения (кристаллизации), $\rho(T)$ – плотность, $c(T)$ – теплоемкость.

Уравнение теплопроводности при решении задачи затвердевания отливки в песчаной форме позволяет вычислить распределение температуры $T(x, y, z, t)$ в отливке и литейной форме [59]. Коэффициентами решаемого уравнения являются переменные, изменяющие свое значение в процессе, – плотность $\rho(T)$, удельная теплоемкость $c(T)$, теплопроводность $\lambda(T)$ и теплота плавления [60]. При компьютерном моделировании теплофизические свойства литейной стали и материала формы (стержней) задаются как исходные данные для расчета в виде температурных зависимостей [61].

Определяющее уравнение является нелинейным и требует на каждом расчетном шаге корреляции динамических переменных в соответствии с исходными данными о температурной зависимости теплофизических свойств [62]. При этом точность компьютерных прогнозов лимитируется на текущий момент недостаточной комплектацией баз данных материалов в специализированных программных пакетах, ориентированных на симуляцию технологий заготовительного производства [63]. Теплофизические свойства многих необходимых материалов и смесей экспериментально не изучены, для нужд инженерных расчетов и решения обратных задач развиваются теоретические представления о связи структуры смесей с их свойствами в широком интервале температур [64]. Вместе с тем, развиваемые модели теплопроводности смесей ввиду неопределенности ключевых параметров

пористости, контакта и агрегатного состояния составляющих частиц и компонентов, не могут быть использованы в прикладных задачах симуляции и проектирования технологических процессов литья.

Вычисленное на первом этапе компьютерного моделирования литейной технологии нестационарное температурное поле передается в рамках связанного анализа в программные блоки, которые выявляют расположение и величину литейных дефектов, включая усадочные дефекты и технологические трещины. При решении задач затвердевания игнорируются особенности кристаллического строения твердого сплава [65]; металлический сплав представляется сплошной средой.

Для компьютерного моделирования процессов затвердевания стальной отливки в песчаной форме [66] необходимо включить в базу данных материалов компьютерной программы температурные зависимости теплофизических свойств литейной стали и формовочной смеси во всем моделируемом температурном интервале, от температуры ликвидус до комнатной температуры. Отсутствие в базе данных требуемых сплавов или материалов формы (стержней, холодильников, вставок, стяжек и других элементов технологической оснастки) приводит к неэффективному использованию программы или некорректным результатам. Достоверность результатов зависит также от зазоров и покрытий [67], от способности расплавленного металла растворять газы и выделять их при затвердевании.

Следует отметить, что базы данных, по умолчанию поставляемые вместе с лицензионным программным обеспечением, содержат ограниченный набор материалов и не содержат данных о материалах с уникальными составами. Более того, зарубежные программы предлагают пользователю базу данных, адаптированную под зарубежные стандарты, поэтому использование зарубежных программ на российских предприятиях требует дополнительных усилий по интерпретации данных.

Наибольший интерес для обеспечения точности расчетов представляют свойства сплавов в интервале кристаллизации, но получение таких данных

экспериментальными методами затруднительно [68] из-за высоких температур, угрожающих целостности оборудования. В стандартах и справочниках по конструкционным материалам можно найти свойства некоторых сталей и сплавов [69] в температурном интервале эксплуатации при нагреве до 600⁰С. Имеющихся справочных данных недостаточно для компьютерного моделирования процессов кристаллизации сплавов и сталей в литейной форме.

Литейные стали и сложно легированные сплавы, как правило, являются многокомпонентными системами. Для моделирования их кристаллизации необходима соответствующая фазовая диаграмма. На текущий момент подробно изучены, построены и оцифрованы фазовые диаграммы двухкомпонентных систем. Недостаток информации о свойствах сплавов можно восполнить их теоретическим моделированием по процентному содержанию легирующих элементов, и это направление в настоящее время активно развивается [70].

Теплофизические свойства литейных сталей и сплавов в температурном интервале кристаллизации можно моделировать, исходя из химического и фазового состава, с использованием программы Java-based Materials Properties (JMatPro) [71]. Тем не менее, остается проблематичным получение информации о механических свойствах сплавов вблизи температуры солидус, что затрудняет достоверную оценку тепловых напряжений и моделирование трещин в отливках при затвердевании в литейной форме [72]. И независимо от того, аналитически или экспериментально исследованы свойства, добавление каждого нового материала в базу данных стоит дорого и всегда требует тщательной проверки.

Что касается формовочных материалов, они часто изготавливаются по техническим условиям предприятия, относятся к нестандартизованным материалам и имеют уникальный состав [73]. Для таких материалов необходима адаптация теплофизических характеристик к условиям производства с организацией периодического контроля и определением

соответствующих свойств непосредственно в цеховых условиях для адекватной регистрации их технологических особенностей [74].

Вследствие влияния многих факторов [75] свойства формовочных материалов для различных литейных производств и цехов индивидуальны. Формовочные пески обладают большой теплоемкостью, которая увеличивается с повышением влажности и температуры. Теплопроводность формовочных смесей зависит от степени уплотнения: уплотненные смеси обладают большей теплопроводностью [76]. К проблематике комплектации свойств материалов песчаных форм, стержней и покрытий для использования в САПР литейной оснастки и технологии изготовления литых заготовок относится также эффект быстрого их изменения после приготовления [77]. В связи с этим свойства материала, измеренные в лаборатории на небольшом тестовом образце, и того же материала в массивной форме могут оказаться разными. Для обеспечения достоверности расчетов необходимо знать свойства материала массивной формы. Следовательно, требуется корректировка модели поведения материала массивной формы, исходя из имеющихся данных о свойствах, полученных из разных источников.

Базы данных материалов известных программ для симуляции литейных технологий открыты для корректировки свойств и внесения в список новых материалов. Данные по материалам в программном комплексе LVMFlow [78] хранятся в формате MS ACCESS. База содержит данные по различным литейным сталям, сплавам, а также по материалам формы и другим материалам, задействованным в технологическом процессе. Литейные сплавы и стали разделены на классы. Металлы, принадлежащие к одному классу, имеют общую базовую диаграмму состояний, например, для углеродистых сталей объединяющей основой является диаграмма Fe-C. Теплофизические свойства для каждого сплава (теплопроводность, удельная теплоемкость, плотность) вводятся в виде температурных зависимостей.

В отдельный класс вынесены материалы формы и вспомогательные материалы. Для формовочных материалов, в отличие от сталей и сплавов, не

задается теплота плавления; соответствующие окна диалога в модуле редактирования свойств в разделе формовочных материалов не открываются. Следует отметить, что в базе данных лицензионной программы LVMFlow отсутствуют формовочные материалы, которые используются в литейном производстве УВЗ.

На рисунке 1.7 показано окно программы LVMFlow для введения и корректировки свойств материалов формы. Температурная зависимость свойства задается точками, численные значения свойства и температуры заводятся в таблицу и отображаются на графике. При обращении решателя в ходе моделирования к табличной функции свойства осуществляется линейная интерполяция в интервалах между имеющимися точками.

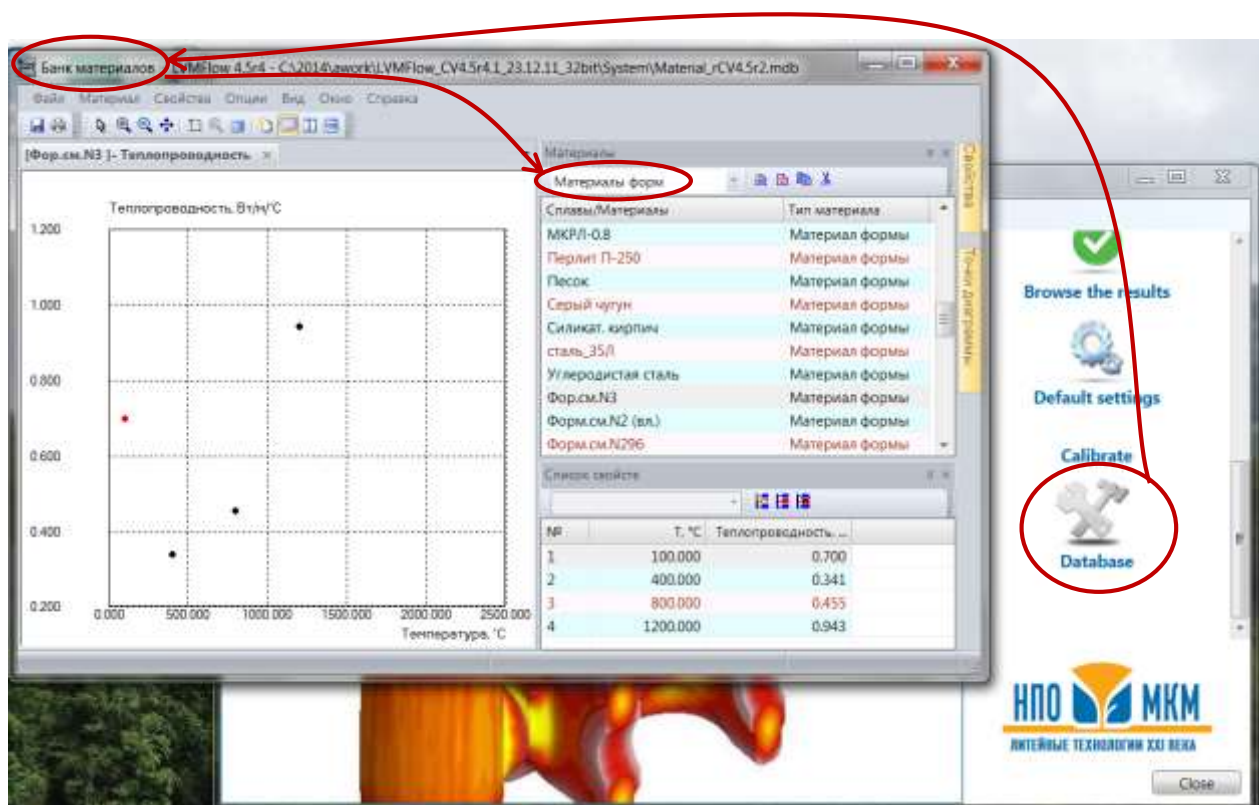
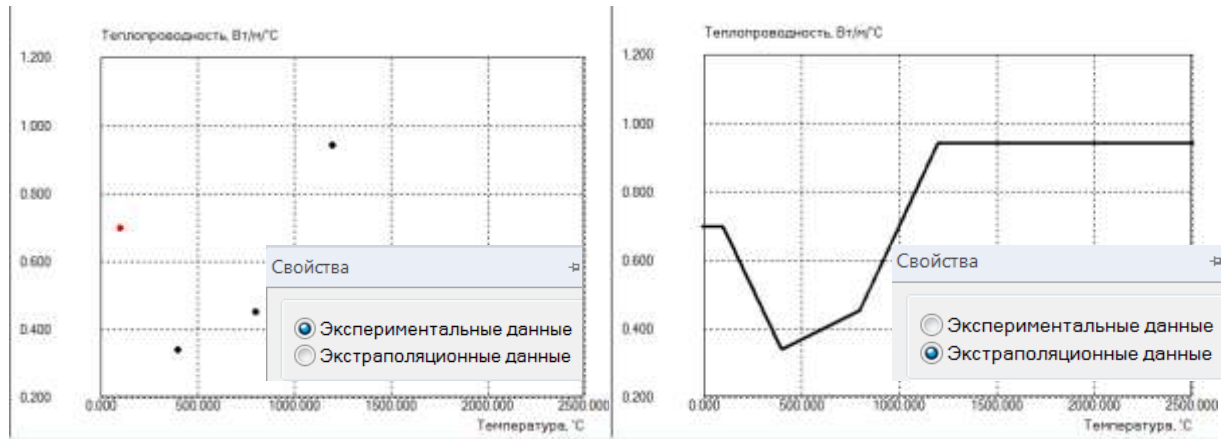


Рисунок 1.7 – Обращение к базе данных материалов (Банк материалов) через стартовое окно программы LVMFlow

Алгоритм экстраполяции температурной зависимости свойств построен в программе LVMFlow таким образом, что крайние точки замыкают температурный интервал горизонтальными линиями (рисунок 1.8). Соответственно, если для температурной зависимости свойства задано

недостаточно точек или точки расположены в узком интервале температур, например, известны значения свойств только при низких температурах, то в расчете температурных полей при компьютерном моделировании литейной технологии используется искаженная информация и получается расчетный результат с ошибкой.



а

б

Рисунок 1.8 – Представление температурной зависимости теплопроводности точками (а) и отрезками линий с экстраполяцией за пределы имеющихся значений (б)

Таким образом, одной из ключевых проблем САПР литейной оснастки и технологии изготовления литых заготовок является отсутствие полных баз данных материалов для обеспечения достоверного компьютерного моделирования [79]. Как правило, в полном объеме информация о технологических свойствах материалов при повышенных температурах отсутствует, и в ряде случаев экспериментально определить необходимые свойства не представляется возможным [80].

Соответственно, возникает необходимость разработать метод корректировки баз данных материалов с учетом заводских условий изготовления отливок для компьютерного моделирования технологий литья, прежде всего, – формовочных материалов на основе песка. Такая корректировка позволит адекватно настраивать компьютерные модели и разрабатывать по результатам моделирования усовершенствованные технологии литья, исключающие образование недопустимых дефектов.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Обоснование выбора САПР литейной технологии LVMFlow

По результатам тестовой эксплуатации различных САПР литейной технологии [81] в данной диссертационной работе для разработки компьютерной модели технологий изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок и проведения вычислительных экспериментов выбрана программа LVMFlow [82] от отечественного разработчика. Достоинствами программы LVMFlow [83], отличающими ее от зарубежных программ ProCast, SolidCast, WinCast, Magma, являются: быстрое время счета; автоматическая генерация расчетной сетки; простой, удобный и интуитивно понятный интерфейс на русском языке, упрощающий обучение рядовых технологов; прямой доступ к базе данных с возможностью редактирования и добавления материалов и их свойств на условиях сохранения коммерческой тайны; ориентированность на российские технологические процессы, стандарты и нормативные документы. Перечисленные достоинства позволяют обозначить программу LVMFlow как лучшую в классе для использования заводскими технологами [84].

В процессе выполнения работы и использования программы LVMFlow в условиях конструкторского бюро литейной оснастки УВЗ [85] был установлен тесный контакт с разработчиками программы – НПО «МКМ» (г. Ижевск), что дает возможность конкретизировать концепцию развития программы и улучшать ее пользовательские сервисы. Следует отметить, что такая возможность прямого участия в развитии программного обеспечения при использовании зарубежных САПР отсутствует. Соответственно, выбор программы LVMFlow как инструмента для вычислительных экспериментов с целью адаптации к моделированию сложных отливок и технологий усиливает практическую и научную значимость данной диссертационной работы.

Решатель программы LVMFlow основан на методе контрольных объемов, который включает уточняющие геометрические характеристики и реалистичнее прогнозирует объем материала в ячейках по сравнению с

методом конечных разностей. Элементарной ячейкой расчетной сетки является куб, для автоматической генерации сетки вводится один параметр – размер ячейки (шаг сетки). Чем меньше шаг сетки, тем точнее выполняется расчет на сетке. Внутри каждой ячейки допускается присутствие нескольких импортированных геометрических объемов, разделенных границей контакта.

Программа LVMFlow имеет отдельный модуль, который позволяет решать только задачу затвердевания после мгновенного заполнения литейной формы расплавом и ориентируется на быструю оценку усадочных дефектов в отливке. Программа имеет ряд дополнительных функций для более точного моделирования процессов литья в песчаные формы: учет дозаливки и заливки из нескольких ковшей, а также типа заливочных ковшей; моделирование тепло-электро-нагревателей и каналов с теплоносителями; моделирование фильтров; учет противопригарных покрытий и образования воздушных зазоров между металлом и формой в процессе затвердевания отливки.

Удобной функцией препроцессора LVMFlow для проведения вычислительных экспериментов является возможность импортировать геометрию отливки, литниково-питающей системы и элементов формы в универсальном формате *.STL и затем указать расположение сенсоров (термопар) в любой точке расчетной области (в отливке или в оснастке). Показания виртуальных сенсоров выводятся в виде графиков изменения температуры, доли жидкой фазы, скорости течения расплава, входного потока расплава. Эти данные можно записать в текстовый файл для дальнейшей обработки внешней автономной программой. Запись производится с изменяющимся шагом по времени, поскольку решение на прямоугольной сетке замкнутой динамической системы уравнений, описывающих процессы тепломассопереноса и основанных на законах сохранения энергии, импульса, массы, уравнений состояния многокомпонентных сплавов, выполняется с автоматическим выбором шага интегрирования по времени. Доступ к редактированию базы данных материалов осуществляется через выделенный модуль с сервисом поточечного ввода температурных зависимостей свойств.

2.2 Свойства литейной стали для изготовления крупногабаритных тонкостенных отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная»

В данной диссертационной работе внимание акцентируется на свойствах формовочных материалов. Используемые в компьютерном моделировании свойства литейной стали подробно изучены и не подвергались значительной корректировке.

В настоящее время стальные отливки используются во всех отраслях машиностроения и по объему производства занимают второе место после чугунных отливок. Из сталей изготавливают литые детали, к которым предъявляются повышенные требования по прочности, пластичности, надежности и долговечности в процессе эксплуатации. Крупногабаритные вагонные отливки ответственного назначения изготавливают, как правило, из конструкционных низколегированных марок сталей, таких как 20ГФЛ, 20ГЛ, 20ГТЛ, 20ФТЛ, 20Г1ФЛ и других. Важным требованием ГОСТ 32400-2013 при этом является обязательное обеспечение механических свойств стали со значениями не ниже указанных в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Механические свойства стали после окончательной термической обработки деталей «Рама боковая» и «Балка надрессорная» [5]

Предел текучести σ_T , МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость KCV^{-60} , кДж/м ²
не менее				
343	510	18,0	30,0	200

Отливки подвергаются обязательной термической обработке, нормализации или нормализации с отжигом I рода. Контроль качества деталей после термической обработки осуществляется по излому контрольного прилива. При периодических испытаниях также проводят исследование микроструктуры, которая должна быть феррито-перлитной, мелкозернистой с величиной зерна, соответствующей номеру 8 по ГОСТ 5639-82.

В литейном цехе крупного стального литья УВЗ для изготовления крупногабаритных стальных отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная» применяется сталь 20ГЛ по ГОСТ 32400-2013 [5]. Химический состав стали 20ГЛ приведен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Химический состав стали 20ГЛ по ГОСТ 32400-2013 [5]

Марка стали	Условное обозначение	Массовая доля элементов, %										
		C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	V	Ti	Al
					не более							
20ГЛ	В	0,17	0,30	1,10								0,02
		-	-	-	0,020	0,020	0,30	0,30	0,60	-	-	-
		0,25	0,50	1,40								0,06

Примечание к таблице 2.2.

- При суммарном содержании в стали хрома, никеля и меди более 0,90% содержание углерода должно быть не более 0,24%.

- Допускаемые отклонения от требований к химическому составу не должны превышать следующих значений, в процентах по массовой доле элементов:

- 0,02 для углерода;
+0,10*; - 0,10 для марганца; * при массовой доле углерода не более 0,24%;
±0,10 для кремния; +0,20 для хрома;
±0,03 для ванадия; +0,30 для никеля; - 0,005 для титана;
+0,005 для серы; +0,005 для фосфора; +0,005 для алюминия.

Выплавка стали на УВЗ для изготовления крупногабаритных стальных отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная» производится скрап-процессом в мартеновских печах емкостью 60 тонн. На шихту для выплавки стали в основной мартеновской печи получен патент РФ [86]. Исходные материалы включают металлические материалы, ферросплавы, шлакообразующие, заправочные материалы, топливо.

Металлические материалы: чугун переклассифицированный по ГОСТ 805-95; чугун переклассифицированно-ванадиевый по ТУ 14-2Р-360-2002; чугунный лом различных категорий и видов по ГОСТ 2787-75; стальной лом и отходы собственного производства различных категорий и видов по ГОСТ 2787-75; никель по ГОСТ 849-2007; алюминий первичный по ГОСТ 11069-2001; алюминий вторичный по ГОСТ 295-98.

Ферросплавы: ферросилиций по ГОСТ 1415-93; силикокальций по ГОСТ 4762-93; ферросиликомарганец по ГОСТ 4756-91; ферромарганец по ГОСТ 4755-91; феррохром по ГОСТ 4757-91; ферромolibден по ГОСТ 4759-91; ферротитан по ГОСТ 4761-91; феррованадий по ГОСТ 27130-94.

Шлакообразующие и заправочные материалы: боксит по ТУ 48-5-240-00; песок формовочный по ГОСТ 2138-91; концентрат плавиково-шпатовый по ГОСТ 29220-91; окатыши флюоритовые по ГОСТ 24626-81; мелочь коксовая по ТУ 0763-199-00190437-2004; синтетический науглероживатель по УГФ-М- ТУ 1914-001-47665149-06; известь свежееобожженная или «недопал» по ТУ 14-2Р-361-2004; известняк по ТУ 14-592-13-97; шамотный бой, отходы собственного производства по ТУ 14-8-173-75; железорудные окатыши по ТУ 0722-003-00186938-2009; окалина прокатного и кузнечного производства по ГОСТ 2787-75; доломит сырой металлургический по ТУ 0753-002-26282295-00; порошки переклазовые и переклазо-известковые спеченные для сталеплавильного производства по ГОСТ 24862-81; руда хромовая по ТУ 0741-031-00186890-99; графит измельченный по ТУ 48-20-54-84.

Топливо: топливо нефтяное (мазут) по ГОСТ 14298-79 (содержание серы рекомендуется не более 2 %); природный газ по ГОСТ 5542-87.

Выплавка стали производится в несколько этапов с соблюдением ряда требований, перечисленных далее.

1. Проверка наличия и готовности к применению всех необходимых материалов.
2. Проверка состояния печи, приборов, работы форсунок, состояния фурм, готовности желоба печи, исправности аэраторов и других устройств.
3. Выполнение заправки печи с целью исправления изношенных мест футеровки пода и откосов ванны.
4. Шихтовка и завалка плавки, исходя из получения углерода в металле по расплаву не менее чем на 0,7 % выше верхнего предела для заданной марки стали.

5. Плавление шихты при максимальной тепловой нагрузке, при этом температура свода не должна опускаться ниже 1650°C ; для интенсификации процесса производится продувка ванны сжатым воздухом.

6. Доводка плавки, в том числе – дефосфорация и десульфурация.

7. Кипение металла; для стали марки 20ГЛ продолжительность общего кипения должна быть не менее 55 минут, при этом «чистое» кипение должно быть не менее 40 минут.

8. Предварительное раскисление и легирование; проводится при содержании углерода в металле, обеспечивающем химический состав металла в заданных пределах.

9. Выпуск и окончательное раскисление плавки; перед выпуском на дно ковша сбрасывают ферросплавы и алюминий; температура расплава в печи перед выпуском составляет около 1630°C .

10. Модифицирование и рафинирование металла аргоном. При выплавке стали 20ГЛ по ГОСТ 32400-2013 обязательным условием является рафинирование инертным газом, поэтому металл продувается аргоном через донную фурму ковша, при этом дополнительно для повышения уровня механических свойств стали проводят модифицирование «порошковой проволокой» при помощи трайб-аппарата.

После выполнения всех перечисленных этапов по выплавке и обработке расплава в ковшах приступают к разливке стали в литейные формы. Рекомендуемая температура разливки стали 20ГЛ: 1560°C - 1590°C .

В базе данных материалов программы LVMFlow сталь 20ГЛ должна быть отнесена к классу углеродистых сталей, который характеризуется общей бинарной (базовой) равновесной диаграммой состояния Fe-C. В базе присутствует распространенная в литейном производстве и близкая по химическому составу сталь 20Л, теплофизические свойства которой представлены достаточным количеством точек. Для анализа достоверности свойств стали 20Л в базе данных материалов программы LVMFlow в данной диссертационной работе проведено сравнение имеющихся в базе свойств с

аналогичными температурными зависимостями, вычисленными с использованием программы JMatPro. Свойства стали 20Л из базы данных материалов программы LVMFlow приведены на рисунках 2.1 – 2.5.

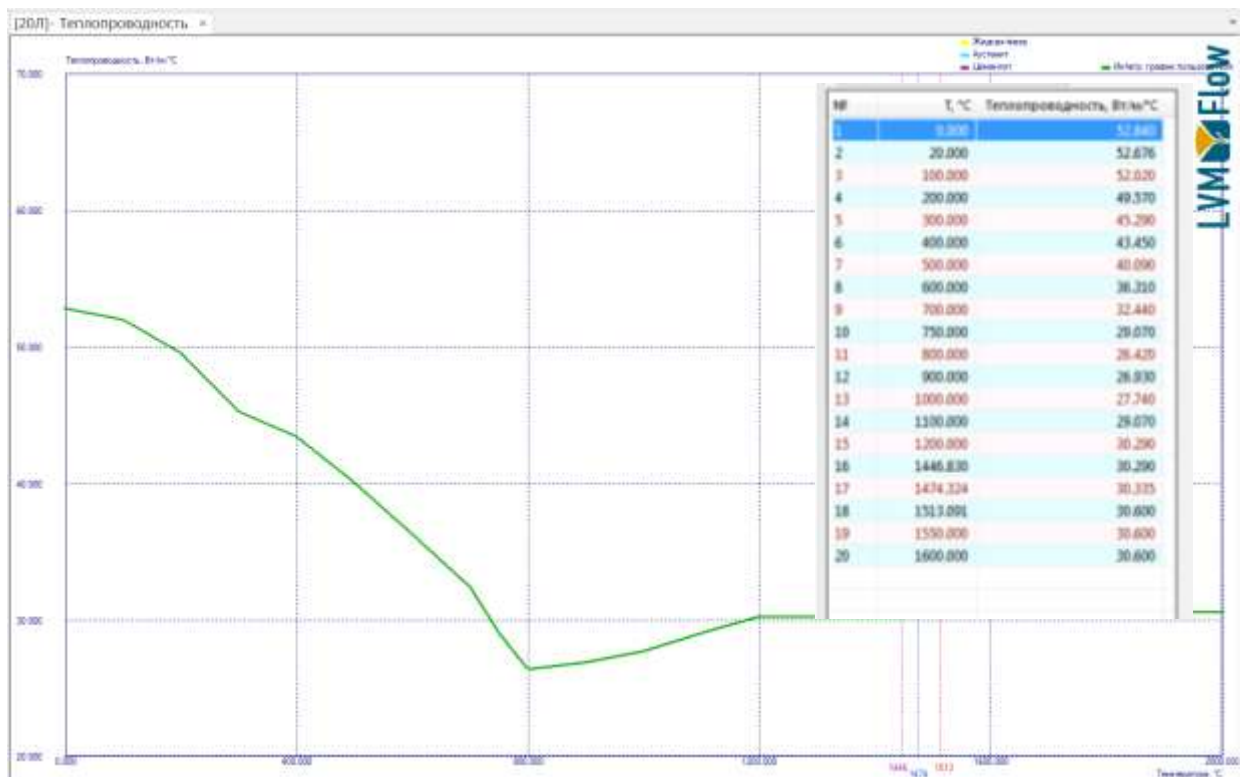


Рисунок 2.1 – Зависимость теплопроводности стали 20Л от температуры

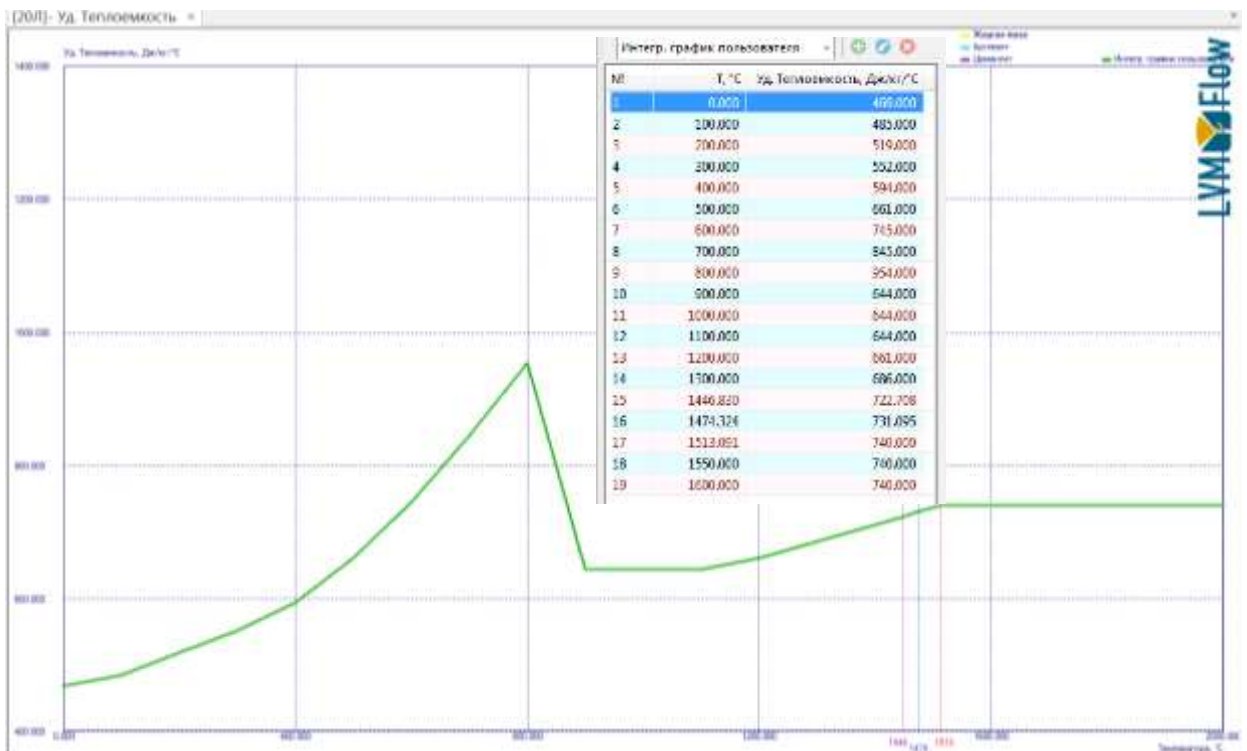


Рисунок 2.2 – Зависимость удельной теплоемкости стали 20Л от температуры

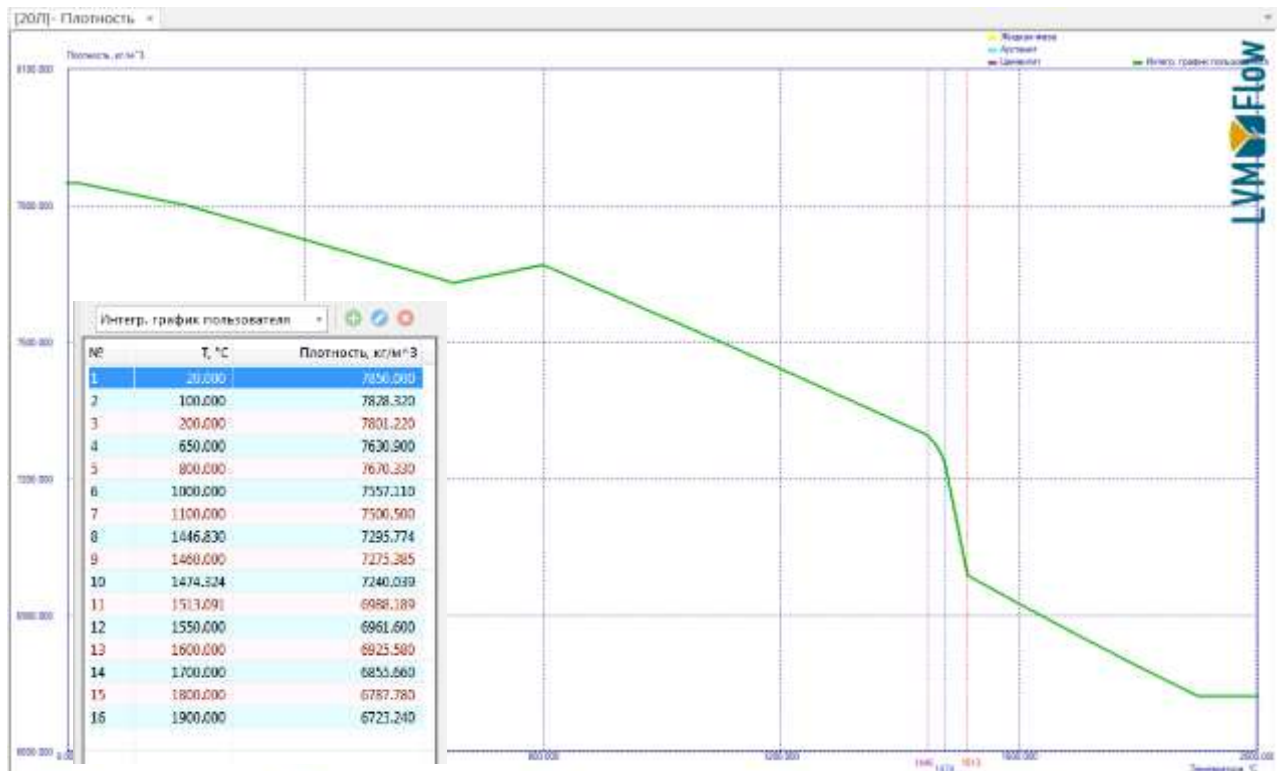


Рисунок 2.3 – Зависимость плотности стали 20Л от температуры

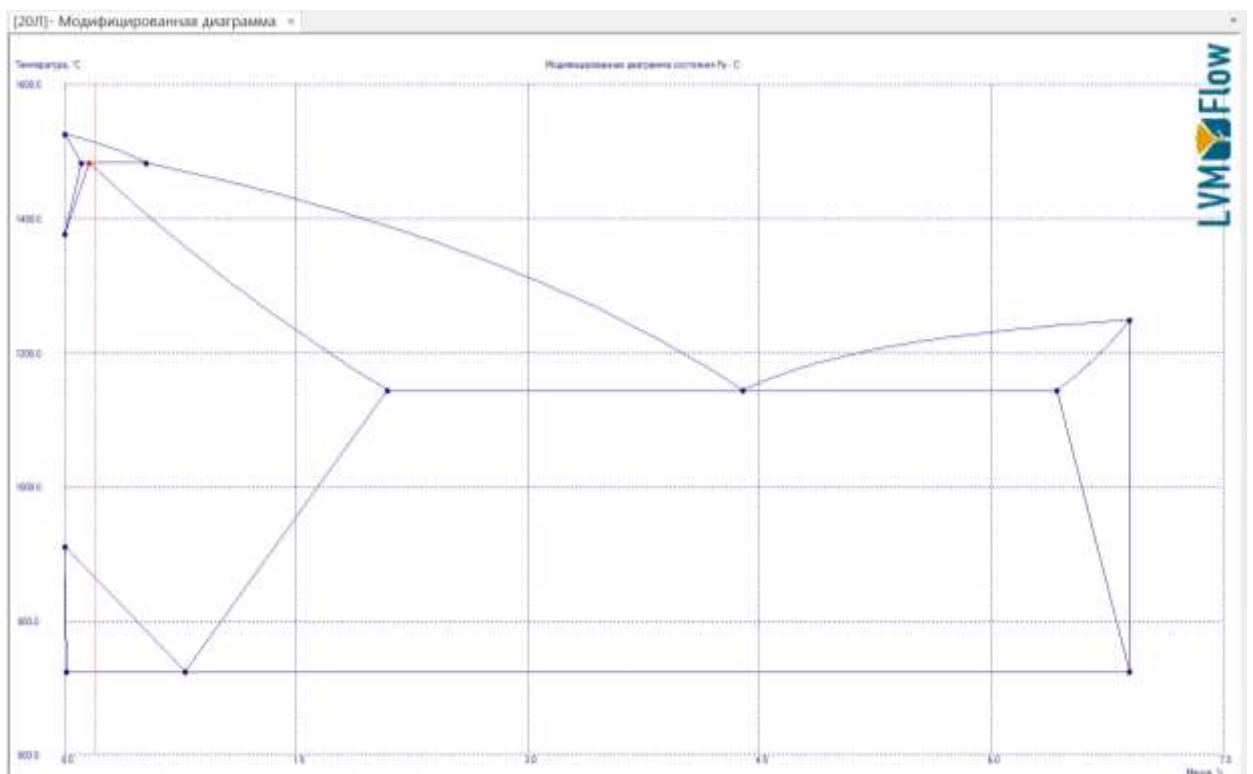


Рисунок 2.4 – Модифицированная диаграмма Fe-C для стали 20Л

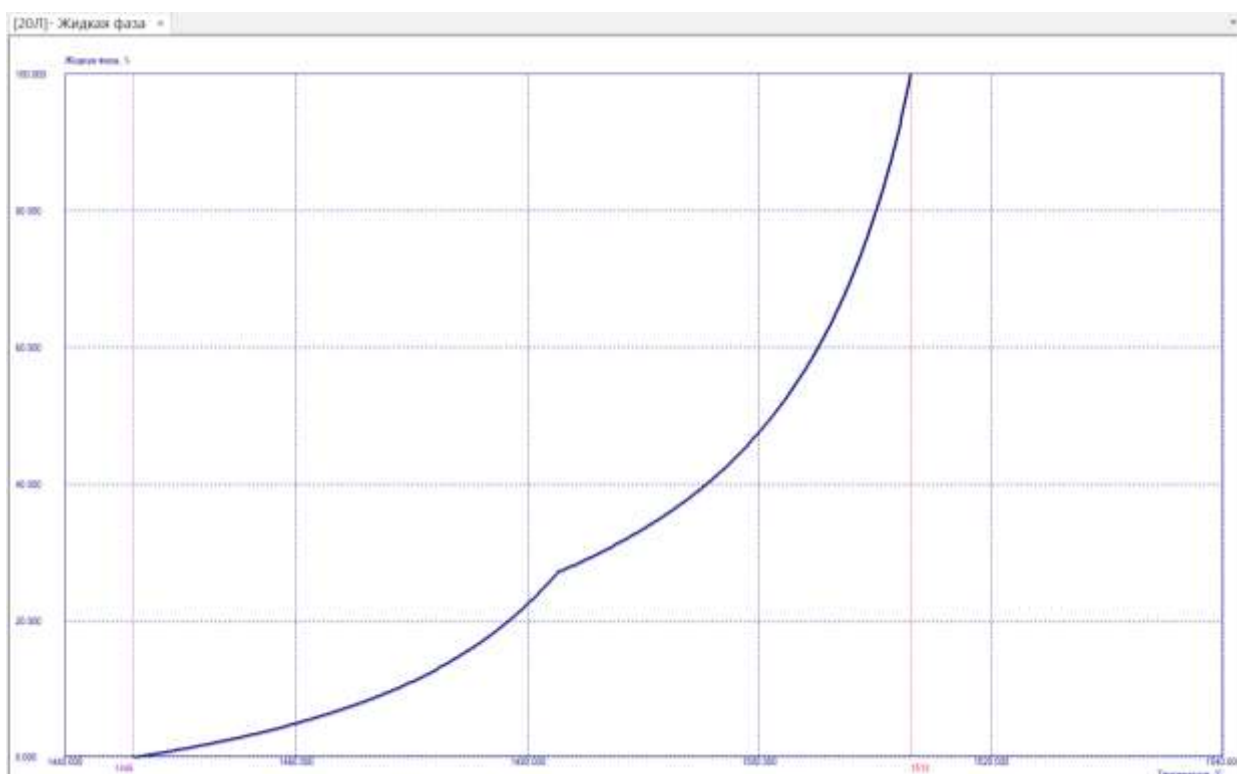


Рисунок 2.5 – Зависимость, характеризующая процентное содержание жидкой фазы в интервале кристаллизации стали 20Л

Химический состав выплавляемой на УВЗ стали 20ГЛ допускает легирование в интервале (массовая доля, %): С (0.17-0.25); Si (0.3-0.5); Mn (1.1-1.4); Cr 0.3; $P \leq 0.04$; $S \leq 0.04$; Cu 0.6; Ni 0.3. В соответствии с вариацией химического состава можно получить неоднозначные характеристики стали. Так, калькулятор фазовой диаграммы в банке данных LVMFlow позволяет вычислить температуры ликвидус и солидус литейного сплава по химическому составу. Для стали 20ГЛ вычисленная температура ликвидус с учетом допускаемых интервалов по всем химическим элементам может варьироваться в интервале $1498,3 - 1511,2^{\circ}\text{C}$, вычисленная температура солидус может варьироваться в интервале $1450,2 - 1476,4^{\circ}\text{C}$, вычисленная температура эвтектического превращения может варьироваться в интервале $1140,8 - 1145,4^{\circ}\text{C}$. Следует отметить, что большие температурные интервалы разброса для важных в компьютерном моделировании кристаллизации характеристик – ликвидуса (13 К) и солидуса (26 К) разрешены химическим составом стали 20ГЛ в соответствии с нормативными документами.

За ликвидус и солидус стали 20ГЛ в базе данных LVMFlow приняты значения, соответствующие середине разрешенного температурного интервала: $1504,8^{\circ}\text{C}$ и $1463,3^{\circ}\text{C}$ соответственно.

Теплофизические свойства стали 20Л, вычисленные по химическому составу с использованием программы JMatPro, показаны на рисунках 2.6 – 2.8.

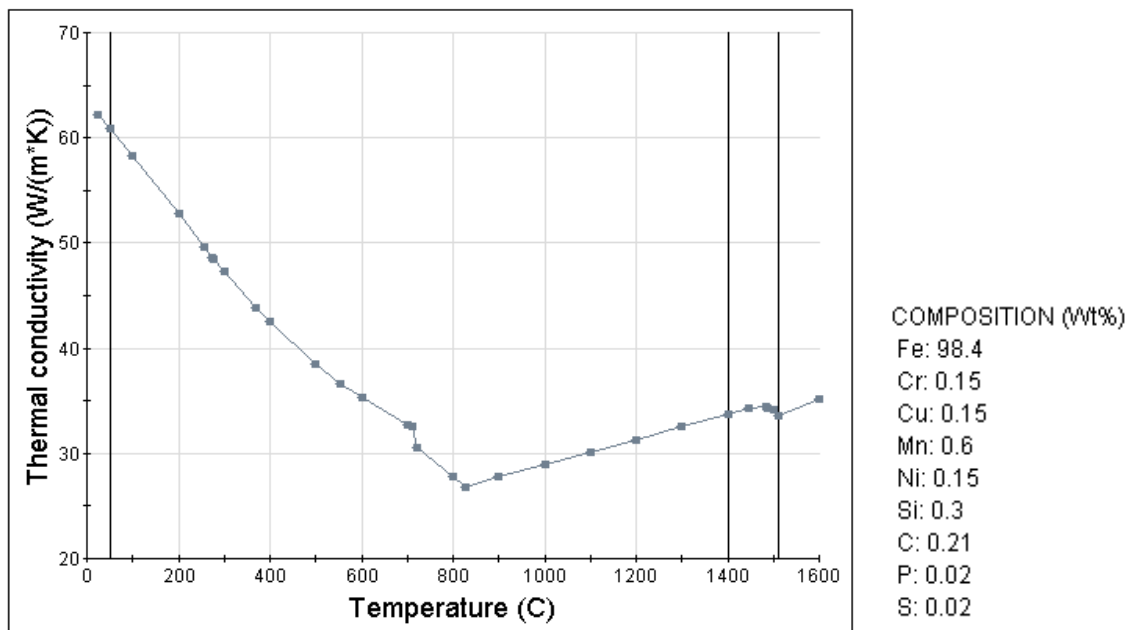


Рисунок 2.6 – Температурная зависимость теплопроводности, рассчитанная для стали 20Л в программе JMatPro

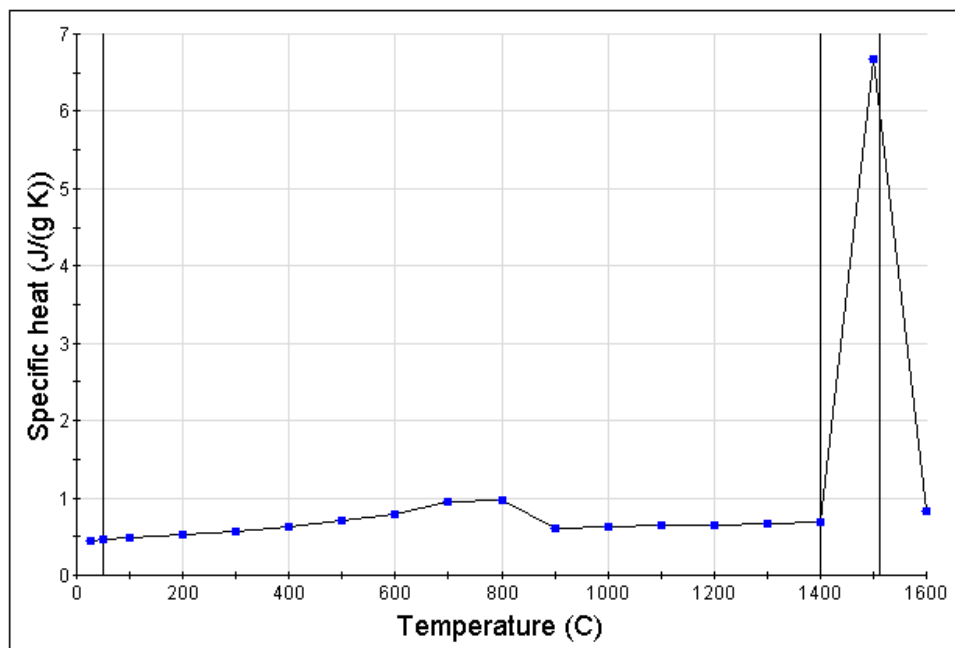


Рисунок 2.7 – Температурная зависимость удельной теплоемкости, рассчитанная для стали 20Л в программе JMatPro

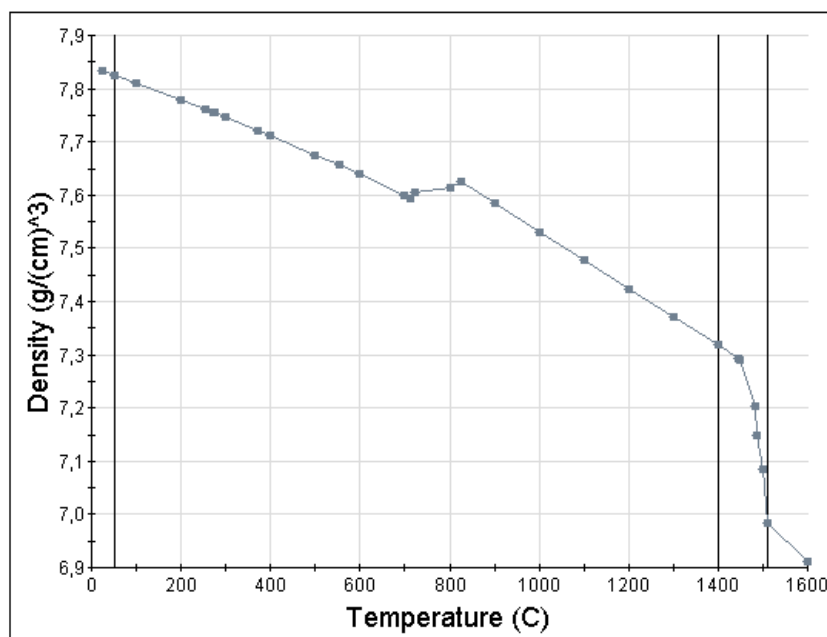


Рисунок 2.8 – Температурная зависимость плотности, рассчитанная для стали 20Л в программе JMatPro

Для коэффициента температуропроводности $\alpha = \lambda/\rho \times c$, включающего плотность, удельную теплоемкость и теплопроводность стали 20Л, относительное среднее арифметическое отклонение значений, полученных из программ LVMFlow и JMatPro, в интервале температур 20–400 °С составляет 0.054, в интервале 400–1200 °С – 0.067, в интервале 1200–1600 °С – 0.120.

Для коэффициента температуропроводности α сталей 20ГЛ и 20Л, относительное среднее арифметическое отклонение значений, полученных из программы JMatPro, в интервале температур 20–400 °С составляет 0.023, в интервале 400–1200 °С – 0.007, в интервале 1200–1600 °С – 0.007.

Сравнительный анализ информации о свойствах сталей 20Л и 20ГЛ, полученных из разных источников [87 – 89], доказывает возможность использования данных о стали 20Л из базы LVMFlow для компьютерного моделирования отливок из стали 20ГЛ с незначительными корректировками.

ГЛАВА 3. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД КОРРЕКТИРОВКИ БАЗЫ ДАННЫХ ФОРМОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

3.1 Характеристики формовочных материалов, применяемых в литейном производстве УВЗ

Теплофизические свойства формы оказывают существенное влияние на процесс формирования отливки [90]. Изменяя теплопроводность и теплоемкость формовочной смеси, можно ускорить или замедлить скорость отвода тепла от отливки и тем самым повлиять на ее качество. При изготовлении отливок сложной конфигурации путем подбора типа смеси, а следовательно, и тепловых свойств формы, можно регулировать скорость охлаждения массивных и тонких частей отливки таким образом, чтобы они затвердевали одновременно или в необходимой последовательности, реализуя принцип направленного затвердевания [91].

Ранее в литейном производстве УВЗ доминировала технология изготовления крупногабаритных тонкостенных отливок в разовых формах из песчано-глинистых смесей (ПГС). Применение ПГС обусловлено доступностью и относительной дешевизной исходных компонентов, способностью обеспечить требуемые технологические свойства смесей при многократном их использовании, сочетаемостью с органическими материалами и различными технологическими добавками, отсутствием выделения токсичных веществ при изготовлении, сушке и заливке форм [92].

В настоящее время в серийном производстве изготовления стержней и форм широко применяются процессы, основанные на использовании холодно-твердеющих формовочных и стержневых смесей (ХТС). Опыт разработки и промышленного освоения ХТС показал, что повышение качества литейной формы может быть достигнуто за счет создания новых смесей с улучшенными физическими и физико-химическими свойствами [93], а также – развития средств механизации и автоматизации.

В обеспечении производственных процессов внимание уделяется прежде всего контролю технологических свойств формовочных и стержневых смесей – прочности на сжатие в сыром состоянии и на разрыв в сухом состоянии, влажности и газопроницаемости, плотности. Другие свойства смесей в большинстве формовочных лабораторий литейных цехов УВЗ не измеряются. В таблице 3.1 приведены основные виды литейных смесей, применяемых на УВЗ для изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок, а также – их свойства, оперативно контролируемые в заводских условиях.

Таблица 3.1 – Контролируемые показатели формовочных и стержневых смесей, применяемых для изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок в условиях УВЗ

№ п/п	Наименование смеси	Прочность при сжатии во влажном состоянии, кгс/см ²	Газо- проница- емость, ед., не менее	Влаж- ность, %	Предел прочности при растяжении образцов, кгс/см ² , не менее	Средняя плотность в зоне рабочей поверхности при 20°C, г/см ³
1	Песчано-глинистая облицовочная смесь	0,47-0,60	120	4,8-6,0	-	1,727
2	Жидкостекольная облицовочная смесь	0,18-0,40	150	3,0-3,6	3,0-5,0	1,789
3	Смесь для Cold-Box Amin процесса	-	-	-	4,0	1,737

При приготовлении формовочных смесей ПГС применяются следующие исходные материалы: 1) пески кварцевые формовочные марок: 5K₃O₂O₃, 5K₃O₃O₃, 3K₃O₂O₃, 3K₃O₃O₃ Кичигинского месторождения, ГОСТ 2138; 2) глина огнеупорная (влажность сухой молотой глины, не более 5%), основные физико-химические показатели огнеупорной глины должны соответствовать СТО - 07518941-78-2014; 3) глина формовочная бентонитовая в соответствии с СТО-07518941-78; 4) жидкое стекло плотностью от 1,47 до 1,52 г/см³ модуль 2,25-2,50 и температурой не выше 45°C ГОСТ 2138; 5) вода техническая.

При приготовлении формовочных смесей ХТС применяются следующие исходные материалы: 1) пески кварцевые марок 1K1O203, 1K1O303, 1K2O203, 1K2O303 Балашейского месторождения, ГОСТ 2138; 2) связующее Альфабонд 07(α -set процесс); Резамин GH 7241 и Резамин АК 8989 (Cold-box - Amin-процесс); Резоформ X850TNO12 ТУ 2221-556-55778270 (No-Bake-процесс); 3) отвердитель Т-03 ТУ 2221-1145-55778270 (α -set- процесс); Резамин К ТУ 2413-589-55778270 (Cold-box- Amin-процесс); 100 t3 ТУ 2494-165-55778270 (No-Bake-процесс).

Количественные составы формовочных и стержневых смесей, применяемых для изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок в условиях УВЗ, приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Составы формовочных и стержневых смесей, применяемых для изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок в условиях УВЗ

№ п/п	Компонент в составе смеси	Наименование смеси		
		Песчано-глинистая облицовочная смесь	Жидко-стеклянная облицовочная смесь	Смесь для Cold-Box Amin процесса
		Массовая доля, %		
1	Песок кварцевый сырой	87	-	-
2	Песок кварцевый сухой	-	88	99
3	Глина огнеупорная	11,5 $\pm$ 1,5	5,0 $\pm$ 0,5	-
4	Вода техническая	1,5 $\pm$ 0,6	0,9 $\pm$ 0,5	-
5	Стекло натриевое жидкое	-	6,1 $\pm$ 0,3	-
6	Фенольный компонент А Резамин GH 7241, ТУ 2221-552-55778270	-	-	0,5 $\pm$ 0,15
7	Изоционатный компонент Б Резамин АК 8989, ТУ 2221-552-55778270	-	-	0,5 $\pm$ 0,15

Состав формовочных смесей может варьироваться в заданном диапазоне, вместе с тем, фиксируются случаи выхода за пределы диапазона; чаще всего это происходит из-за несовершенной системы дозирования компонентов. Таким образом, в условиях крупносерийного производства

возможны отклонения по заданному составу формовочных смесей, но по основным свойствам (влажность, газопроницаемость, прочность на сжатие) отклонения не допускаются, и неудовлетворяющая требованиям смесь подлежит возврату и переработке в качестве наполнительной.

Следует отметить, что приведенные данные относятся к литейному производству УВЗ и учитывают территориальные требования, выбор месторождений. В свою очередь, от используемых песков зависит выбор связующих [94] и технология изготовления [95, 96] стержней, формы. В итоге тепловые свойства литейной формы могут оказаться уникальными для конкретного производства и отличаться от аналогичных производств на других предприятиях из-за различия в составах.

Сталелитейные цехи УВЗ в основном работают на кварцевых песках Кичигинского, месторождения. Кварцевые пески Басьяновского и Балашейского месторождения используются только для приготовления стержневых смесей. Для крупных отливок развесом от 65 до 500 кг, изготавлиющихся в цехе крупного и среднего стального литья, применяются облицовочная и наполнительная формовочные смеси. Облицовочная смесь готовится только на свежем кварцевом песке и обладает большей огнеупорностью и газопроницаемостью.

Ранее при разработке технологии изготовления стержней особое внимание уделялось правильному выбору нужной группы стержневой смеси в зависимости от назначения стержня в отливке. Например, сульфитно-опилочные смеси обладают хорошей податливостью и незначительной сухой прочностью, их применяли при изготовлении стержней для отливок с затрудненной усадкой. Малая сухая прочность достигается введением в смесь до 24 % древесных опилок. Применение данной группы смесей при изготовлении ответственных отливок снижает возможность образования горячих трещин. Стержневые глинистые смеси со значительной сырой прочностью готовятся исключительно на свежем кварцевом песке, они применяются для изготовления сырых стержней.

Для увеличения поверхностной прочности, уменьшения осыпаемости стержней и уменьшения засора в форме при заливке металлом сырые стержни перед тепловой обработкой опрыскиваются из пульверизатора сульфитной бардой с удельным весом 1,07-1,1. Поверхности стержней, сильно омываемые металлом, окрашиваются противопопригарными красками. Основным огнеупорным материалом для изготовления противопопригарных красок в случае стального литья является маршалит. Для предупреждения сваривания литых наружных холодильников с поверхностью отливки применяется маршалитовая краска, а также краска следующего состава (по объему): 40 % железного сурика; 60 % жидкого стекла (удельный вес 1,38-1,45). Краска ровным слоем наносится на поверхность холодильников.

Следует отметить, что преобладающим компонентом формовочных и стержневых смесей, применяемых для изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок в условиях УВЗ, является кварцевый песок, содержание которого в составе превышает 87 % по массовой доле. Для кварцевого песка температурные зависимости теплофизических свойств подробно изучены и могут быть использованы в качестве исходных данных для корректировки свойств смесей.

В базе данных материалов программы LVMFlow имеется группа «Материалы форм», в которой представлен небольшой набор формовочных и стержневых смесей. Примеры представления теплофизических свойств формовочных смесей в базе данных LVMFlow показаны на рисунках 3.1 – 3.3 для смеси под названием «Смесь № 2». Пробные расчеты показывают, что эти свойства близки к свойствам применяемой в условиях УВЗ песчано-глинистой облицовочной смеси. Отталкиваясь от названий смесей в базе материалов, можно предположить, к какой технологии они относятся (ХТС или ПГС), однако в базе не содержится информация о составе смесей и их технологических свойствах.

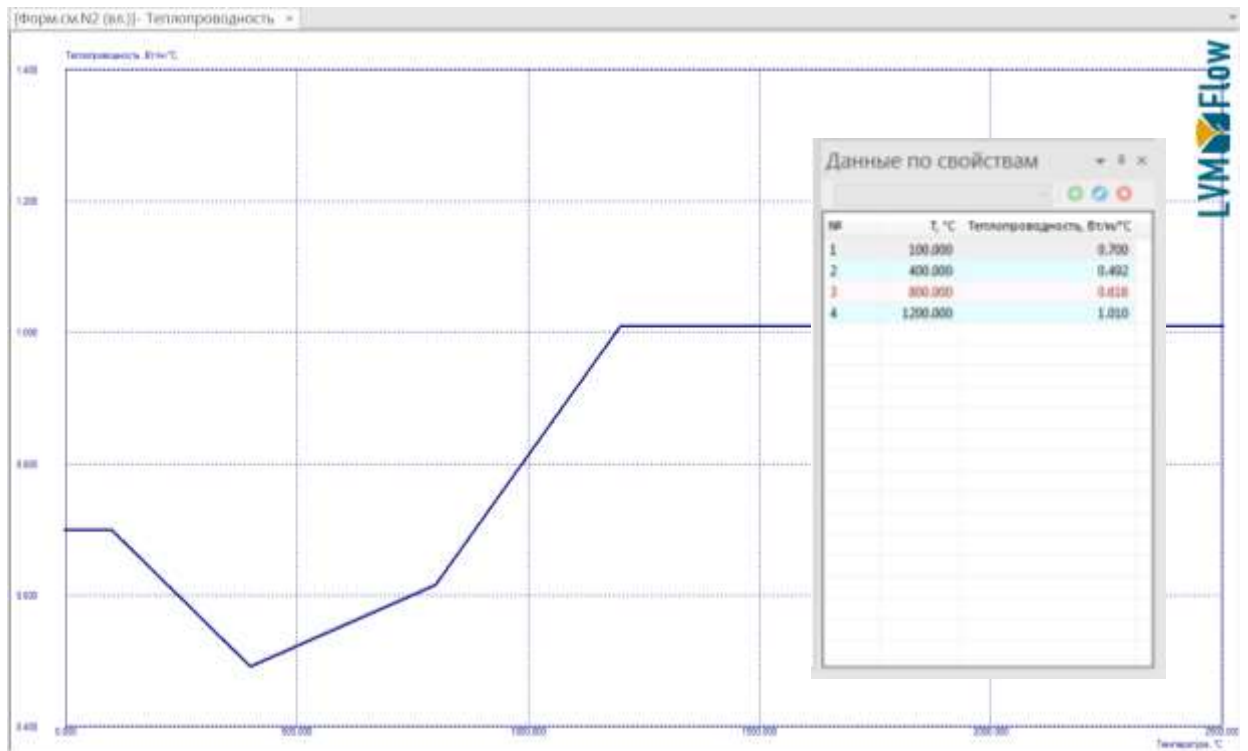


Рисунок 3.1 – Зависимость теплопроводности формовочной смеси № 2 от температуры в базе LVMFlow

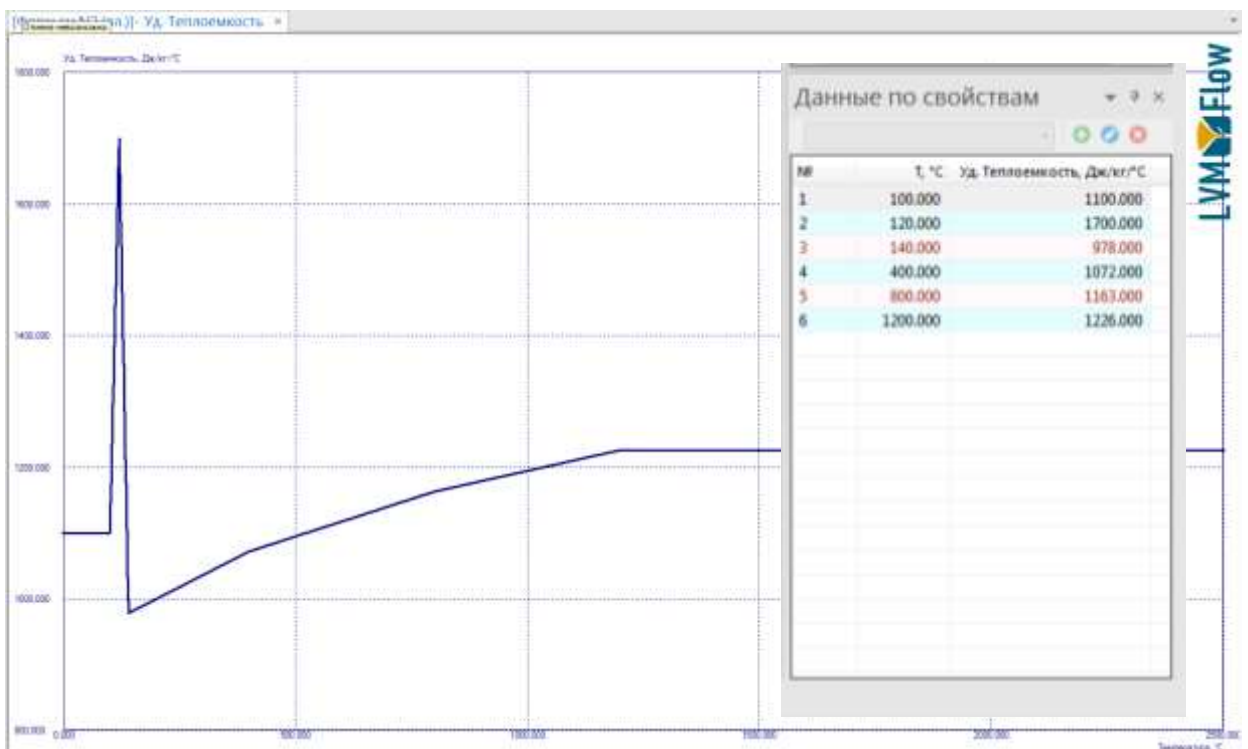


Рисунок 3.2 – Зависимость удельной теплоемкости формовочной смеси № 2 от температуры в базе LVMFlow

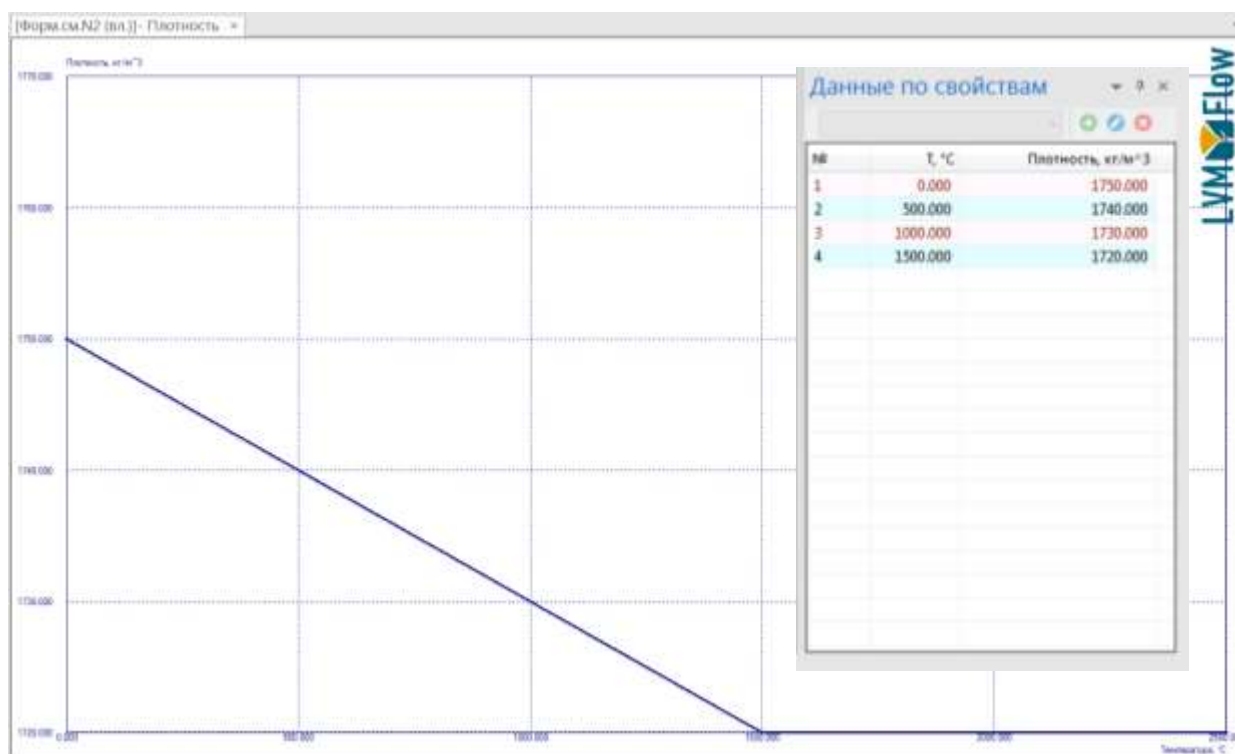


Рисунок 3.3 – Зависимость плотности формовочной смеси № 2 от температуры в базе LVMFlow

Проблема, которая высветилась при тестировании литейных САПР в КБ литейной оснастки УВЗ, заключается в отсутствии полной и достоверной информации о необходимых для разработки компьютерных моделей свойствах материалов [97]. Имеющиеся дискретные зависимости свойств от температуры могут содержать небольшое количество экспериментальных точек, тогда отсутствующая информация заполняется данными, интерполированными или экстраполированными линейными зависимостями в широких интервалах. Наряду с отсутствием экспериментальных точек в высокотемпературном интервале данное обстоятельство может негативно отразиться на точности расчетов.

Так, отсутствием достоверных сведений о теплофизических свойствах материалов можно объяснить неверные результаты прогнозирования усадочных дефектов в литой детали «Балка надressорная», полученные при тестировании программы SolidCast [98]. Оценка результатам тестирования программы SolidCast дана объективно и непредвзято. Расчеты для стальной детали «Балка надressорная» выполнены при поставке на УВЗ оборудования

зарубежными партнерами, которые, согласно договору, были обязаны изготовить на установленном оборудовании годные детали. Пробные детали изготовлены с применением аналогичного оборудования на зарубежном предприятии зарубежными специалистами, затем там же разрезаны и подробно изучены по всем критическим сечениям. Местоположение, размеры и характер фактически выявленных дефектов не соответствуют результатам моделирования в программе SolidCast (рисунки 3.4 и 3.5).



Рисунок 3.4 – Результаты компьютерного моделирования отливки «Балка надрессорная» в программе SolidCast: локализация усадочных дефектов (а) и тепловые узлы (б)



Рисунок 3.5 – Фактические дефекты в сечениях отливки «Балка надрессорная»

После получения неверных прогнозов по усадочным дефектам в американской программе SolidCast вопрос верификации систем компьютерного моделирования на УВЗ был поставлен в разряд приоритетных направлений исследований [99].

В рамках данного диссертационного исследования выполнены лабораторные испытания формовочных материалов, указанных в таблице 3.1, на специально подготовленных образцах для определения удельной теплоемкости методом дифференциальной сканирующей калориметрии, коэффициента температуропроводности – методом лазерной вспышки, температурного коэффициента линейного расширения – методом дилатометрии. Измерение свойств бентонитовой смеси, используемой на линии HWS, в лабораторных условиях не проводилось в виду короткого времени, в течение которого состав и свойства остаются актуальными.

Измеренные характеристики оказались непригодными для моделирования процессов затвердевания крупногабаритных отливок, поскольку получены при нагреве от комнатной температуры до 300⁰C (теплоемкость – до 900⁰C) на маленьких образцах диаметром до 1 см с задержкой по времени после изготовления и не отражают в полной мере тепловое поведение материалов в массивной литейной форме при охлаждении крупногабаритной стальной отливки от температуры ликвидус.

Таким образом, для устранения выявленной проблемы недостаточных данных о свойствах материалов, препятствующей разработке точных компьютерных моделей литейных процессов, возникает необходимость разработать метод восстановления недостающих свойств, включающий не только доступные экспериментальные измерения, но и расчетную часть.

3.2 Экспериментальная база для корректировки теплофизических свойств формовочных материалов

Для обеспечения расчетно-экспериментального метода корректировки свойств были разработаны варианты выполнения экспериментальной части в заводских условиях УВЗ, которые предполагают измерение температурных полей при затвердевании отливки в форме.

3.2.1 Эксперимент по определению теплофизических свойств формовочной смеси для цилиндрической тестовой отливки

Натурный эксперимент по затвердеванию тестовой цилиндрической отливки из стали 20ГЛ проведен в заводской лаборатории УВЗ. Цилиндрическая геометрия тестовой отливки позволяет приблизить решаемую задачу теплопроводности к осесимметричной постановке.

Для измерения температуры в натурном эксперименте по затвердеванию тестовой отливки в цилиндрической форме используется 6 термопар, расположенных на разном удалении от оси симметрии, как показано на рисунке 3.6: 4 термопары установлены в форме и 2 термопары погружены в затвердевающую отливку.

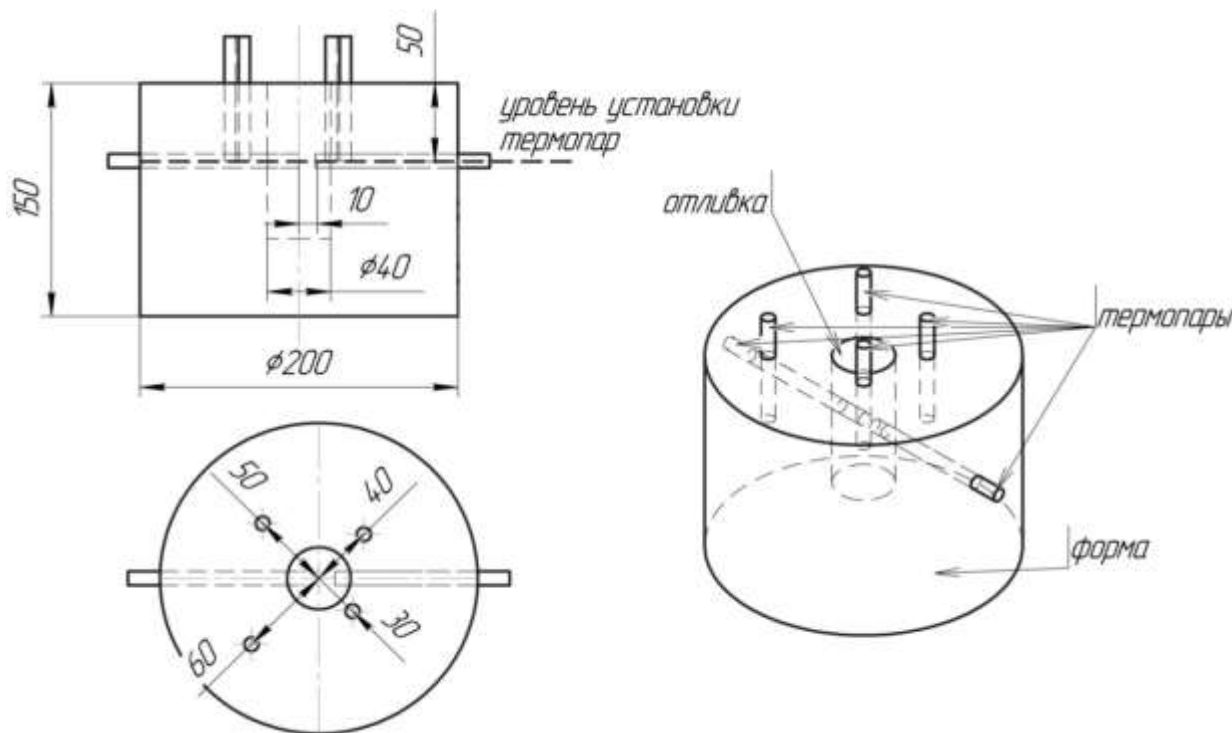


Рисунок 3.6 – Схема расположения термопар в эксперименте по затвердеванию отливки в цилиндрической форме

Подготовка натурного эксперимента в заводских условиях показана на рисунке 3.7. При проведении идентичного вычислительного эксперимента в программе LVMFlow в геометрическую модель (рисунок 3.8) введены термопары, сборка которых включает платиновые (платино-родиевые) проволоки, погруженные в изолятор (фарфор), защищенные трубкой и кожухом (кварцевое стекло).



Рисунок 3.7 – Подготовка эксперимента по затвердеванию тестовой отливки в цилиндрической форме в заводских условиях

Пробные симуляции показывают, что наличие в геометрической модели термопар снижает относительную погрешность вычисления температуры расплава в начальный период на 5 %. В базу данных LVMFlow внесены соответствующие материалы для конструктивных элементов термопары, свойства которых взяты из справочников [69, 87].

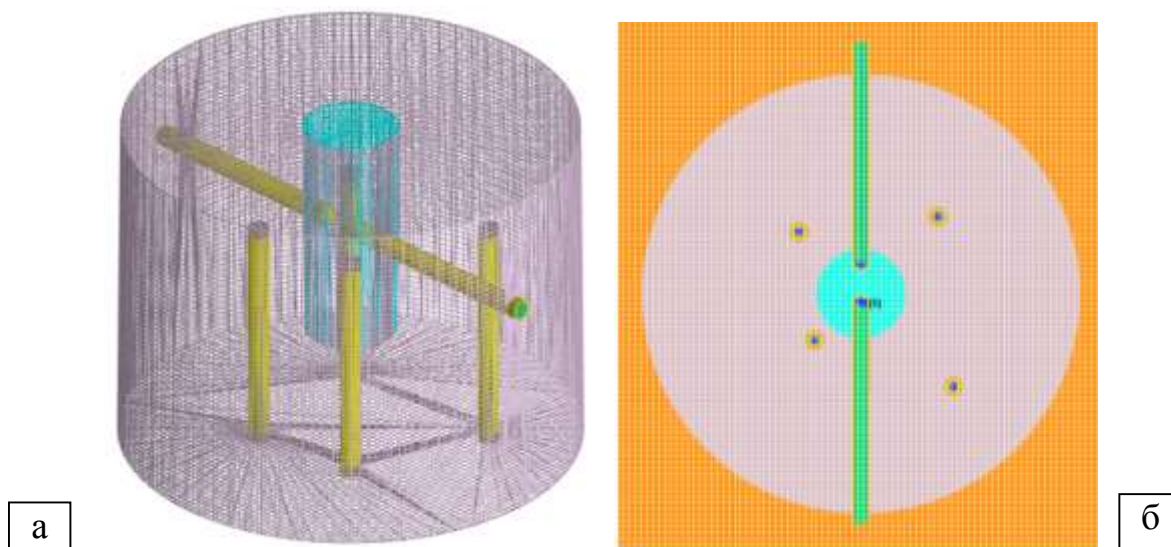


Рисунок 3.8 – Геометрическая модель с расположенными в цилиндрической форме термопарами (а) и соответствующая расчетная сетка (б) в вычислительном эксперименте LVMFlow

Эксперимент по затвердеванию отливки в цилиндрической форме может быть использован для формирования набора свойств формовочных материалов в однотипных заводских условиях.

3.2.2 Эксперимент по уточнению теплофизических свойств материала формы для крупногабаритной отливки

Экспериментальную часть с целью уточнения теплофизических свойств материала формы можно выполнить для отливки произвольной геометрии. В качестве верифицирующего эксперимента в цеховых условиях УВЗ изготовлены отливки «Рама боковая» с установкой 16 датчиков контроля температуры, как показано на рисунке 3.9 и 3.10.

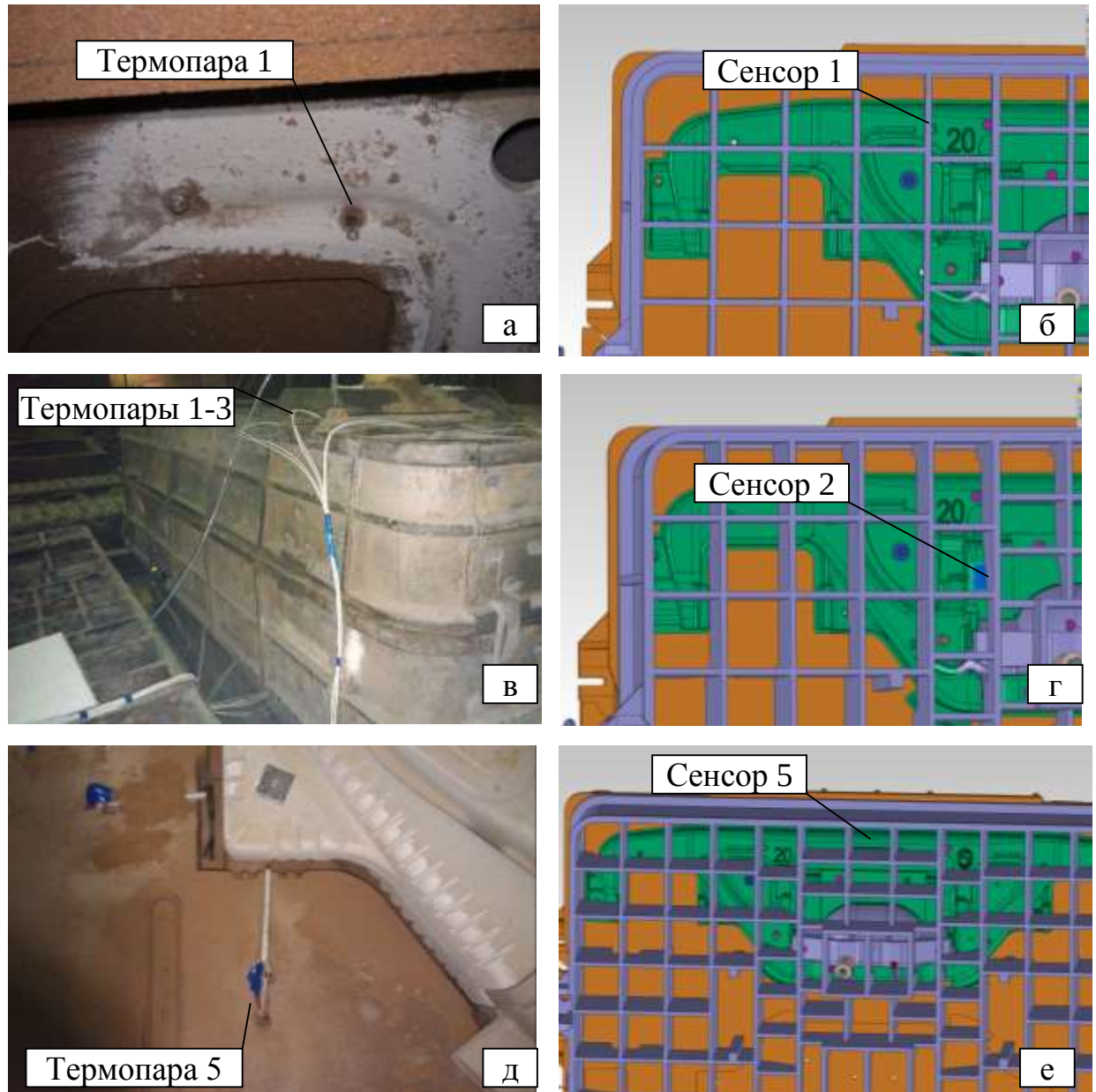


Рисунок 3.9 – Положение термопар в верхней полуформе (а, в, д) и соответствующих сенсоров температуры в компьютерной модели (б, г, е)

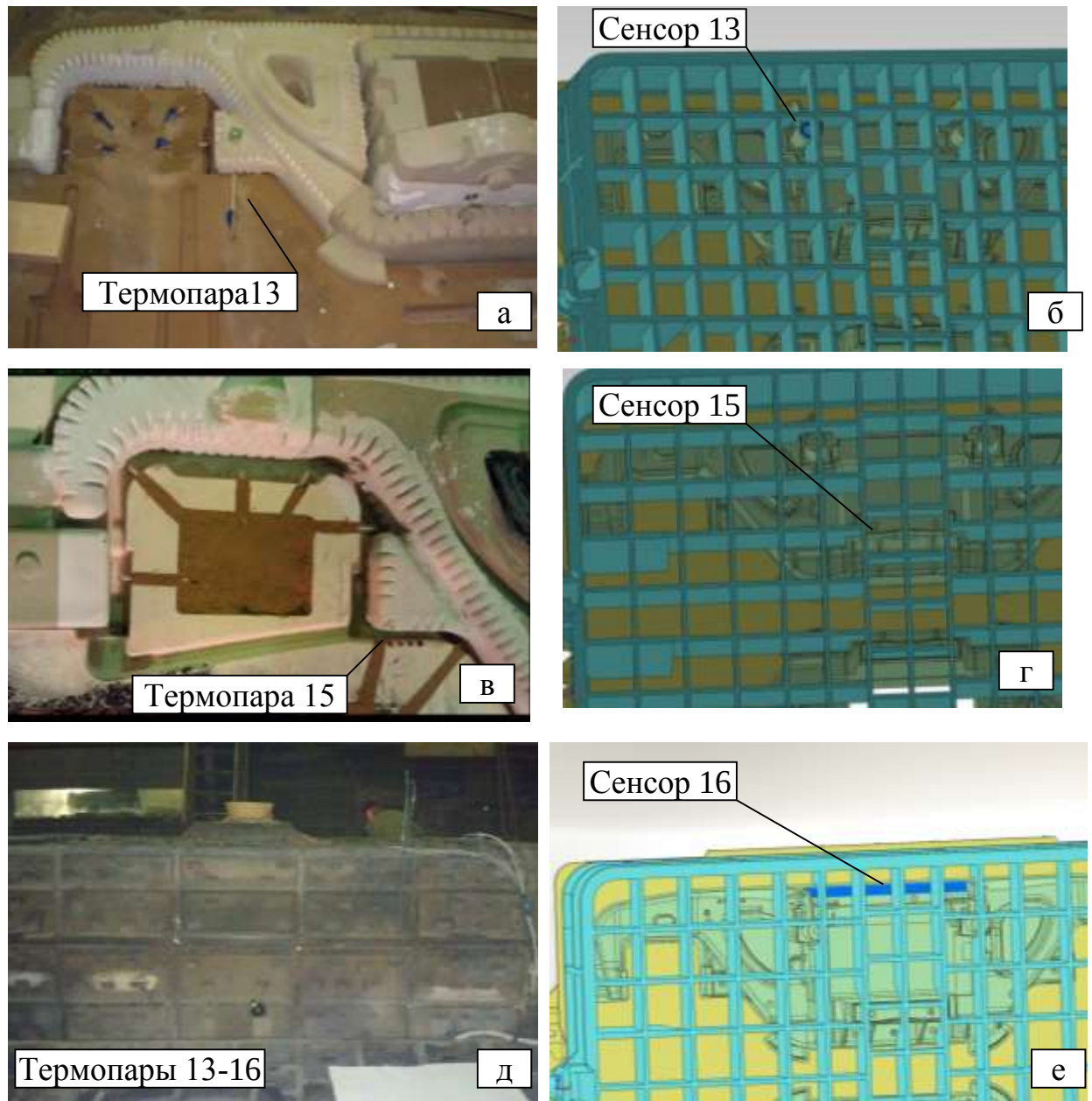


Рисунок 3.10 – Положение термопар в нижней полуформе (а, в, д) и соответствующих сенсоров температуры в компьютерной модели (б, г, е)

В программе LVMFlow выполнено компьютерное моделирование аналогичной технологии с назначением сенсоров температуры в идентичных пространственных точках модели. В качестве материалов формы из базы данных программы выбраны материалы, предположительно близкие по свойствам. Маркировка сенсоров температуры в компьютерной модели отливки показана на рисунке 3.11.

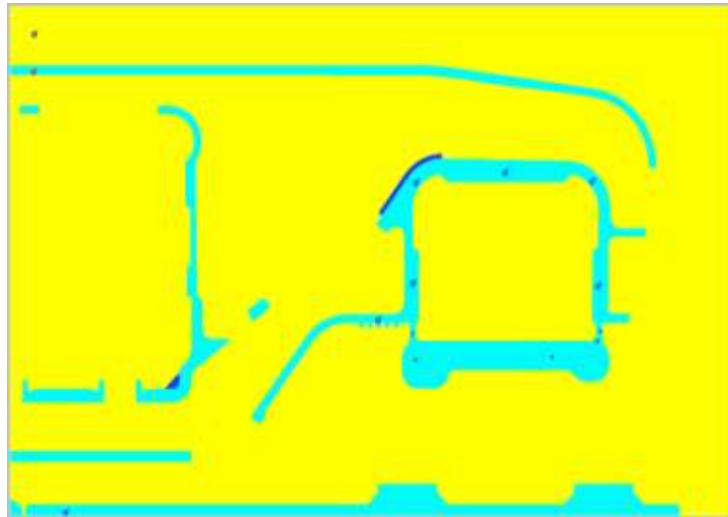


Рисунок 3.11 – Сенсоры температуры в компьютерной модели крупногабаритной тонкостенной отливки «Рама боковая»

Полученные температурные кривые от реальных термопар (рисунок 3.12) и виртуальных сенсоров температуры позволяют проверить компьютерную модель технологического процесса и уточнить свойства материалов формы с учетом цеховых условий.

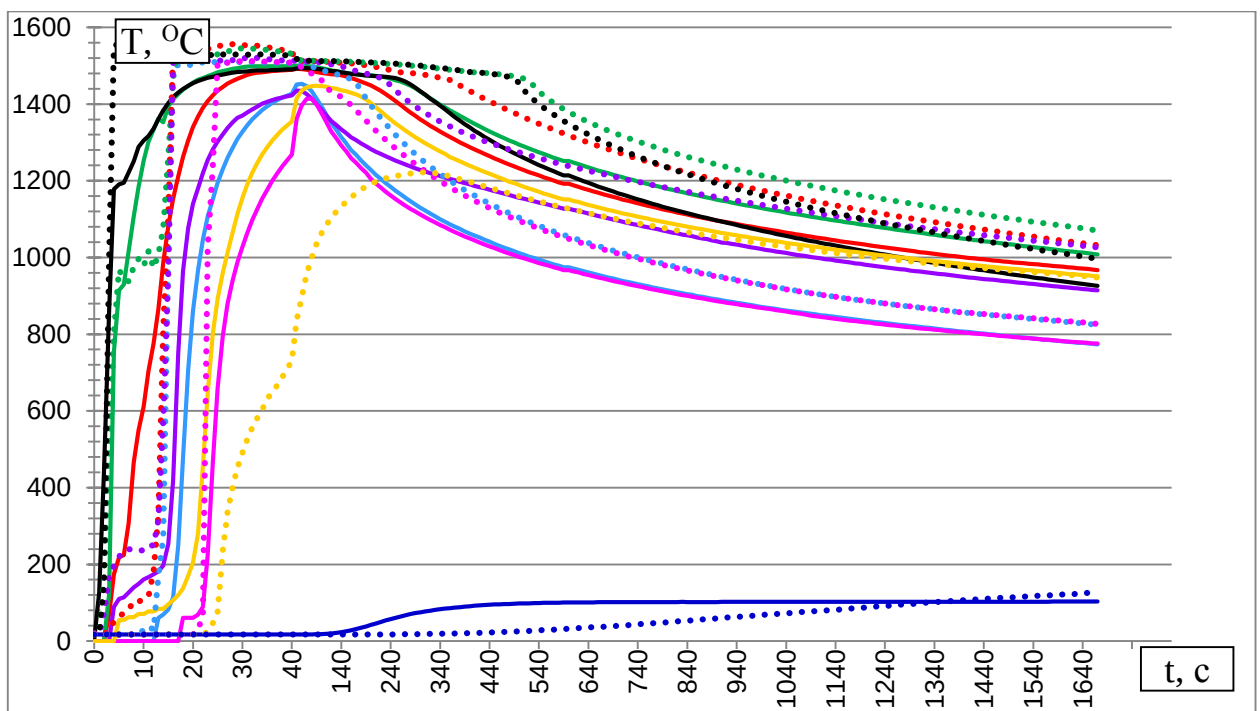


Рисунок 3.12 – Показания термопар в процессе затвердевания отливки «Рама боковая»

Эксперимент по затвердеванию отливки произвольной геометрии в песчаной форме может быть использован для корректировки компьютерной

модели конкретной технологии в цеховых условиях с учетом особенностей приготовления формовочной смеси и изготовления формы. Такой эксперимент целесообразно проводить для крупногабаритных тонкостенных отливок в серийном производстве.

3.3 Расчетная часть метода

Расчетная часть метода корректировки теплофизических свойств формовочных материалов необходима для совмещения экспериментальных и вычисленных температурных полей в литейной форме за счет направленного изменения свойств формовочного материала в базе данных программы LVMFlow. При этом экспериментальное измерение температуры термопарами в нескольких точках литейной формы проводится при затвердевании тестовой отливки или крупногабаритной отливки в массивной форме в соответствии с разработанными вариантами экспериментальной части метода. Далее в программе LVMFlow проводится компьютерное моделирование идентичного эксперименту процесса затвердевания, решается на расчетной сетке прямая задача теплопроводности, и таким образом формируется два набора температурных кривых. Метод, не ограничивая сложность геометрической модели отливки и формы, позволяет уточнять компьютерные модели процессов затвердевания крупногабаритных тонкостенных отливок в песчаных формах.

3.3.1 Разработка математического и программного обеспечения расчетной части метода САПР литейной оснастки и технологии изготовления крупногабаритных отливок в песчаных формах

В диссертационной работе разработано математическое обеспечение расчетной части метода, позволяющего восстановить неизвестные температурные зависимости теплофизических свойств формовочных материалов для заполнения базы данных материалов САПР литейной технологии. В разработке математического обеспечения расчетной части метода САПР литейной оснастки и технологии изготовления

крупногабаритных отливок в песчаных формах использован эффективный алгоритм многопараметрической оптимизации.

В качестве исходных данных для восстановления свойств формовочных материалов, приняты имеющиеся в базе данных LVMFlow температурные зависимости теплопроводности и теплоемкости кварцевого песка. Такой подход в данной работе объясняется компонентным составом смесей, применяемых для изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок в условиях УВЗ. В составе смесей массовая доля кварцевого песка составляет не менее 87 %.

Поскольку температурные зависимости теплопроводности и теплоемкости являются коэффициентами нелинейного уравнения теплопроводности, их восстановление требует решения обратной задачи теплопроводности. Решение обратной задачи в разработанном методе выполняется с использованием оптимизирующего алгоритма Левенберга-Марквардта [100]. Алгоритм Левенберга-Марквардта используется в технологиях искусственного интеллекта для быстрого обучения нейронных сетей на больших данных. Алгоритм является итерационным и требует задания начальных значений теплофизических свойств, которые подлежат изменению в последующих итерациях. В соответствии с алгоритмом производится последовательное приближение заданных начальных значений параметров (значений теплофизических свойств) к оптимальным значениям, удовлетворяющим критерию качества [101].

Алгоритм итерационного решения построен таким образом, что уточненные значения искоемых теплофизических свойств S^k на некотором итерационном шаге k можно вычислить по набору экспериментальных T_i^{exp} и расчетных T_i^{calc} значений температуры в сравнении с набором значений свойств на предыдущем шаге S^{k-1} :

$$S^k - S^{k-1} = (J^T \times J + \mu \times I)^{-1} \times J^T \times (T_i^{\text{exp}} - T_i^{\text{calc}}), \quad (3.1)$$

где матрица Якоби $J = \frac{\partial T_i}{\partial S_j}$ составляется в серии вычислительных экспериментов, фиксирующих изменение расчетной температуры $T(x, y, z, t)$ при последовательном единичном возмущении всех точек на графиках температурной зависимости уточняемых свойств; I – единичная матрица; коэффициент регуляризации μ обеспечивает получение хорошо обусловленной обратной матрицы $(J^T \times J + \mu \times I)^{-1}$.

Промежуточные и окончательные результаты решения обратной задачи оцениваются по критерию качества, который характеризует наилучшее сближение экспериментальных и расчетных температурных полей после выполнения процедуры уточнения теплофизических свойств в базе данных материалов компьютерной программы LVMFlow. Критерием качества выбран параметр $K = \frac{\sum |T_i^{\text{exp}} - T_i^{\text{calc}}|}{\sum T_i^{\text{exp}}}$, отражающий близость расчетных T_i^{calc} и экспериментальных T_i^{exp} значений температуры. Критерий качества в решаемой задаче минимизируется.

Последовательность выполнения расчетной части метода на каждом шаге приближения k содержит следующие шаги.

Шаг 1. Составляется вектор экспериментальных значений температуры $\{T^{\text{exp}}\}$, полученных от термопар:

$$T^{\text{exp}} = \begin{Bmatrix} T_1^{\text{exp}} \\ \vdots \\ T_N^{\text{exp}} \end{Bmatrix} \quad \text{или} \quad \{T^{\text{exp}}\} = \{T_i^{\text{exp}}(t)\} \quad , i=1, \dots, N \quad , \quad (3.2)$$

где время t является независимой переменной.

Шаг 2. Составляется вектор стартовых значений свойств формовочных материалов $\{S^{\text{start}}\}$:

$$S^{\text{start}} = \begin{Bmatrix} S_1^{\text{start}} \\ \vdots \\ S_M^{\text{start}} \end{Bmatrix} \quad \text{или} \quad \{S^{\text{start}}\} = \{S_j^{\text{start}}(T)\} \quad , j=1, \dots, M \quad , \quad (3.3)$$

где компоненты вектора свойств могут быть значениями теплоемкости и теплопроводности.

Шаг 3. Выполняется компьютерное моделирование технологии с использованием стартовых значений свойств. Составляется вектор расчетных значений температуры, соответствующий стартовым значениям свойств:

$$T^{calc} = \begin{Bmatrix} T_1^{calc} \\ \vdots \\ T_N^{calc} \end{Bmatrix} \quad \text{или} \quad \{T^{calc}\} = \{T_i^{calc}(S, t)\} \quad , i=1, \dots, N \quad , \quad (3.4)$$

Шаг 4. Составляется и представляется в виде произведения матриц функция ошибки, отражающая уровень несовпадения расчетных значений температуры с экспериментальными:

$$\begin{aligned} F(S) &= \sum_{i=1}^N \left(T_i^{exp} - T_i^{calc}(S) \right)^2 = \\ &= \left\{ \{T^{exp}\} - \{T^{calc}\} \right\}^T \left\{ \{T^{exp}\} - \{T^{calc}\} \right\} \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (3.5)$$

Шаг 5. Для системы уравнений $\frac{\partial F}{\partial S_j} = 0$, которая отражает условие приближения расчетных значений температуры к экспериментальным и составляется из частных производных функции ошибки от свойств, формируется матрица Якоби J дискретной функции $T^{calc}(S)$:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_1^{calc}}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial T_1^{calc}}{\partial S_M} \\ \vdots & \frac{\partial T_i^{calc}}{\partial S_j} & \vdots \\ \frac{\partial T_N^{calc}}{\partial S_1} & \dots & \frac{\partial T_N^{calc}}{\partial S_M} \end{bmatrix} \quad , j=1, \dots, M, i=1, \dots, N \quad , \quad (3.6)$$

Матрица Якоби составляется из результатов вычислительных экспериментов, в которых регистрируются температурные кривые в точках установки сенсоров для малого изменения каждого отдельного значения из вектора свойств $\{S^{start}\}$. Сначала выполняется симуляция затвердевания отливки в соответствии с технологией. На итерационном шаге $j=1$ значение S_1 из вектора свойств снижается на величину ∂S_1 , выполняется симуляция и выявляется смещение температурных кривых ∂T_i^{calc} . На следующем

итерационном шаге $j=2$ свойство S_1 возвращается к исходному значению, значение S_2 из вектора свойств снижается на величину ∂S_2 , выполняется симуляция и выявляется смещение температурных кривых ∂T_i^{calc} . Всего проводится M вычислительных экспериментов в итерациях.

Шаг 6. Выполняется проверка сингулярности матрицы Якоби и вычисляется коэффициент регуляризации μ по норме матрицы погрешностей $\|J^T \times J\|$, как величина, обратная числу обусловленности матрицы $[J^T \times J]$:

$$\mu = \frac{\|J^T \times J\|}{\|J^T \times J - I\|} \quad (3.7)$$

Матрица Якоби не является сингулярной (вырожденной), если ее определитель не равен 0, и тогда возможно устойчивое вычисление обратной матрицы.

Шаг 7. В линейном приближении:

$$\{T^{calc}(S)\} = \{T^{calc}(S^{start} + \Delta S)\} \cong \{T^{calc}(S^{start})\} + J \times \{\Delta S\} \quad (3.8)$$

минимизируется функция ошибки и вычисляется искомый вектор приращения стартовых значений свойств $\{\Delta S\} = \{S_k - S_{k-1}\}$ в соответствии с выше приведенной формулой (3.1).

Расчетная часть метода реализована в виде программного кода в среде MatLab с интерфейсной пользовательской оболочкой и автоматизированной обработкой массивов входных данных [102]. Часть разработанного кода представлена в приложении П1. Интерфейсные окна разработанной программы представлены в приложении П2. Интерфейсные окна отражают шаги решения задачи о восстановлении свойств формовочных материалов.

3.3.2 Верификация расчетной части метода

Для верификации расчетной части метода проведен вычислительный эксперимент. В базе данных материалов LVMFlow выбрана песчаная смесь с содержанием бентонита 11%. Симулировано затвердевание цилиндрической отливки из стали 20ГЛ в цилиндрической форме из выбранной песчаной смеси. В двух точках, назначенных в центре отливки и в форме, записаны температурные кривые охлаждения, которые в вычислительном эксперименте

являются экспериментальными. Далее в базе данных материалов создан новый материал, которому назначены температурные зависимости теплопроводности и теплоемкости. Назначенные температурные зависимости состоят из 3 точек с одинаковыми значениями свойства: $0.65 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ для теплопроводности и $1000 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ для теплоемкости. Разработанный метод применен для уточнения свойств нового материала. Приближения свойств в итерациях метода приведены на рисунке 3.13.

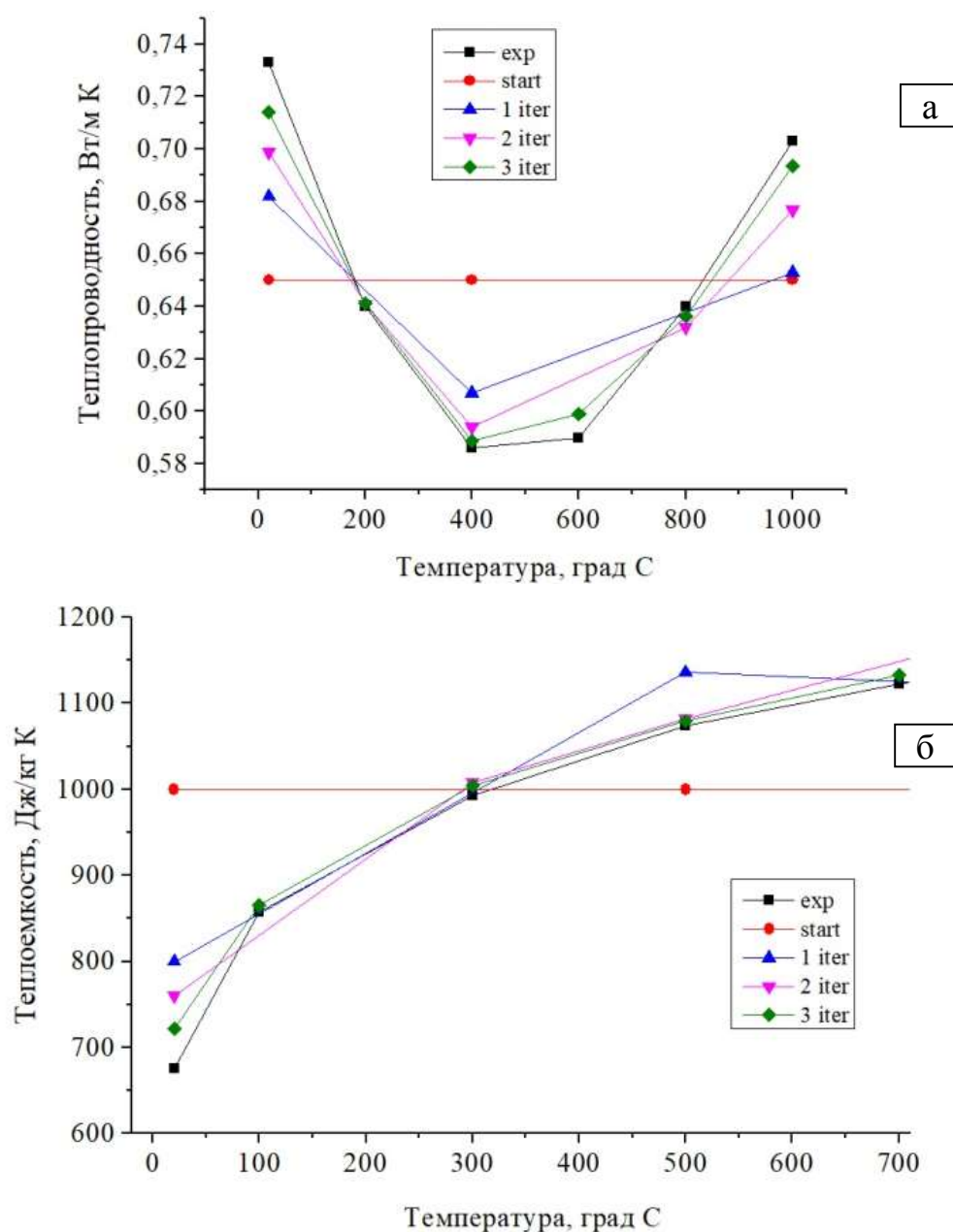


Рисунок 3.13 – Восстановление температурной зависимости теплопроводности и теплоемкости в верифицирующем расчете: exp – кривые, соответствующие эталонному расчету, 3 iter – кривые после 3 итерации

Разработанный метод за 3 итерации восстанавливает температурные зависимости теплопроводности и теплоемкости выбранного материала. Распечатка рабочего окна MatLab с программными кодами, комментариями и расчетными результатами приведена в приложении П1.

3.3.3 Восстановление свойств материала формы с использованием экспериментальных данных

Неопределенность в назначении свойств формовочных материалов показана на примере ХТС смеси по Furan-процессу, которая присутствует в базах данных материалов всех литейных программ, причем значения свойств в разных базах могут различаться значительно, как показано в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Свойства ХТС смеси по Furan-процессу в разных САПР

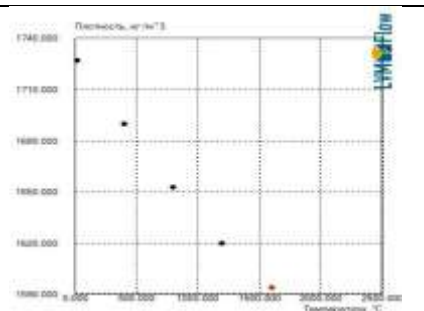
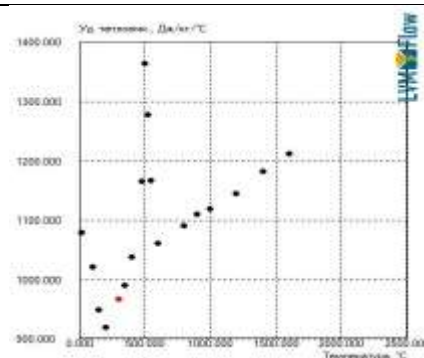
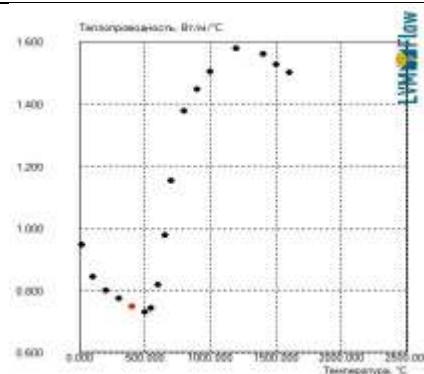
Температура, °С	LVMFlow			SolidCast			WinCast		ProCast		
	Теплопроводность *	Теплоемкость *	Плотность *	Теплопроводность	Теплоемкость	Плотность	Теплопроводность	Теплоемкость	Теплопроводность	Теплоемкость	Плотность
20	1,0	500	1600	0,405	1033	1569	0,465	600			
22											1430
100									0,478	1045	1425
180				0,497	1071	1559					
200									0,505	1071	1419
300	0,75	1000							0,517	1096	1413
340				0,53	1102	1551					
400							0,559	610	0,516	1120	1406
500	0,55	2000	1550	0,513	1146	1542			0,511	1143	1398
600		1000							0,507	1167	1390
660				0,497	1179	1534					
700									0,507	1191	1387
800							0,665	918	0,517	1215	1384
820				0,53	1217	1527					
900									0,547	1238	1382
980				0,578	1255	1519					
1000	0,8	1100	1500						0,6	1262	1379
1100									0,682	1285	1376
1140				0,724	1299	1512					
1200							0,802	983	0,805	1309	1367
1300				0,967	1337	1502			0,973	1333	1359
1400									1,194	1356	1351
1460				1,339	1374	1496					
1500	1,1	1200	1480						1,479	1380	1343
1600									1,836	1404	1335
1620				1,857	1418	1489					

* Теплопроводность (Вт/(м×К)); теплоемкость (Дж/(К×м³)); плотность (кг/ м³).

Базовым экспериментом по измерению температурных полей является затвердевание тестовой отливки в цилиндрической форме. Экспериментальные данные по измерению удельной теплоемкости облицовочной песчано-глинистой смеси, применяемой в цехе крупного стального литья УВЗ, были заданы в качестве исходных значений параметров для восстановления теплофизических свойств материала формы с использованием оптимизатора [103]. В итерациях оптимизации на третьем шаге достигнут итоговый коэффициент качества 3 %. Вычисленные свойства облицовочной песчано-глинистой смеси цеха крупного стального литья, внесенные в базу данных LVMFlow, показаны в таблице 3.4.

Таблица 3.4– Вычисленные свойства облицовочной песчано-глинистой смеси

Темпе- ратура, °C	Свойства			Тепло- проводность	
	Тепло- проводность, Вт/(м·K)	Тепло- емкость, Дж/(K·м³)	Плотность, кг/ м³		
20	0.95	1080	1727		
100	0.845	1022			
150		950			
200	0.802	920			
300	0.777	967.9			
350		990.5			
400	0.75	1038.2	1690		
480		1166.7			
500	0.733	1364.3			
520		1278.3			
550	0.745	1167.8			
600	0.821	1061.4			
650	0.98				
700	1.155				
800	1.38	1091.6	1653		
900	1.45	1111			
1000	1.507	1120			
1200	1.58	1145	1620		
1400	1.563	1183			
1500	1.53				
1600	1.503	1212	1594		



Фактическая плотность смеси, измеренная в заводских условиях при комнатной температуре, равна 1727 кг/м^3 . Основными исходными материалами для приготовления песчано-глинистой смеси являются песок, глина и связующие добавки. В базе данных материалов LVMFlow имеются свойства нескольких песчано-глинистых смесей. По результатам тестовых симуляций наиболее близкой к исследуемой смеси по свойствам оказалась формовочная смесь № 2 (влажная).

На рисунке 3.14 показаны в сравнении температурные кривые для термопары, позиционированной в центре цилиндрической отливки, которые получены экспериментально и в расчете с набором свойств из базы данных LVMFlow (формовочная смесь № 2, влажная), а также – с набором восстановленных теплофизических свойств смеси.

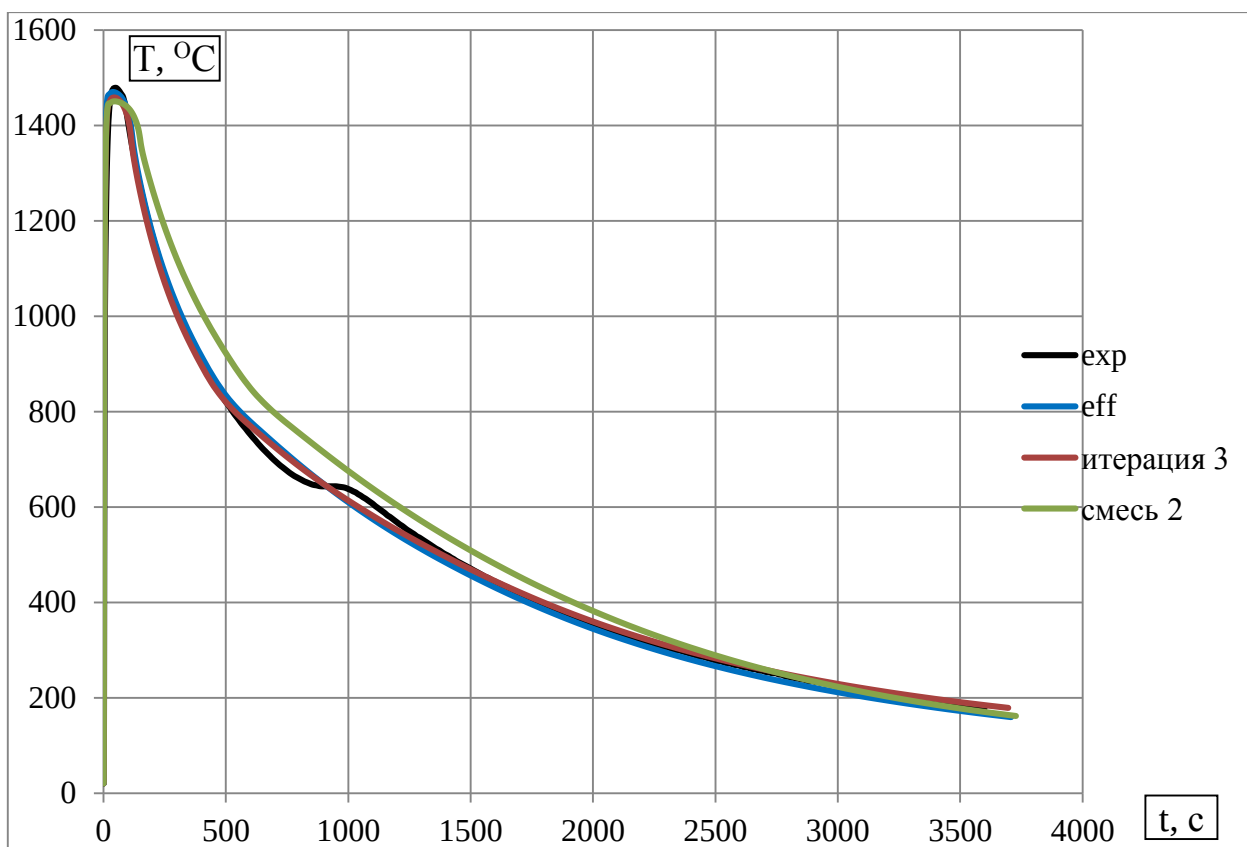


Рисунок 3.14 – Показания термопары (exp) и расчетные температурные кривые с эффективными теплофизическими коэффициентами (eff), с набором теплофизических свойств из базы данных LVMFlow (смесь 2), и определенными с помощью оптимизатора теплофизическими свойствами ПГС смеси (итерация 3)

3.4 Выводы по главе 3

1. Разработан и верифицирован на тестовых отливках новый метод САПР литейной оснастки и технологии изготовления литых заготовок, позволяющий уточнить теплофизические свойства материалов песчаных форм как входных данных для компьютерного моделирования технологий изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок способом литья в песчаные формы.

2. Разработанный метод состоит из экспериментальной и расчетной частей. Экспериментальная часть выполняется в заводских условиях УВЗ на тестовых или геометрически сложных отливках с учетом специфики конкретного производства и заключается в измерении термопарами температуры при затвердевании отливки в форме. Расчетная часть уточняет значения теплопроводности и удельной теплоемкости формовочных смесей в составе компьютерной модели технологии литья путем совмещения экспериментальных и вычисленных кривых изменения температуры при затвердевании отливки в изучаемой литейной форме.

3. Разработанный метод может быть применен для формирования пула свойств материалов на однотипной тестовой отливке (в этом случае предпочтительной будет цилиндрическая геометрия отливки) или для корректировки вычислительной модели проблемных отливок (в этом случае геометрия отливки может быть произвольной).

4. С использованием разработанного расчетно-экспериментального метода выполнена корректировка базы данных материалов программы LVMFlow для моделирования технологии изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок в песчаных формах [104] в условиях УВЗ.

5. Уточненные в цеховых условиях базы данных формовочных материалов позволяют повысить точность в определении температурных полей при компьютерном моделировании процессов затвердевания крупногабаритной тонкостенной отливки в песчаной форме, и как следствие, – обеспечить более точное прогнозирование усадочных дефектов и кристаллизационных трещин [105] в отливке.

ГЛАВА 4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ

4.1 Компьютерная модель технологии изготовления крупногабаритной тонкостенной стальной отливки

Компьютерная модель технологии литья базируется на геометрических моделях отливки, литниково-питающей системы, холодильников и элементов формы, которые транслируются в препроцессор САПР литейной технологии LVMFlow из 3D CAD в триангулированном формате STL (рисунок 4.1).

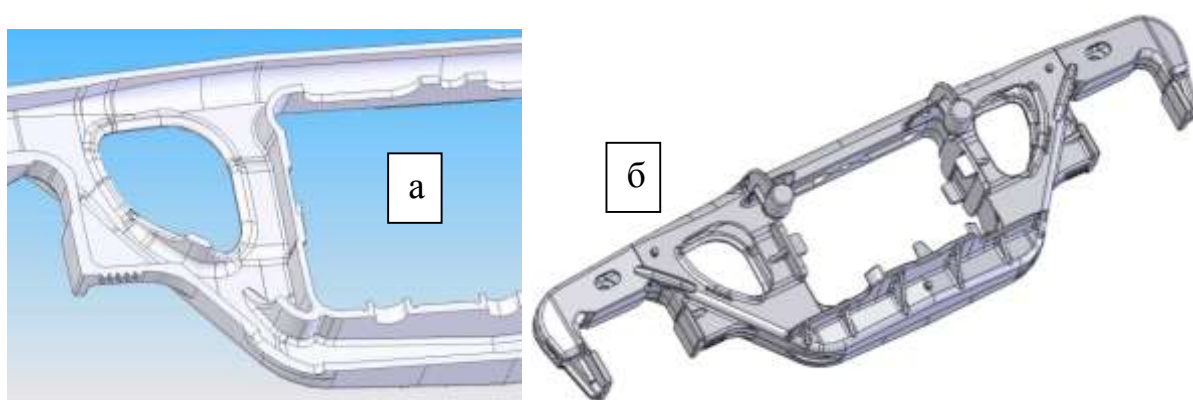


Рисунок 4.1 – Подготовка модели 3D CAD для симуляции технологии литья:
полость в разрезе отливки (а), добавление прибылей (б)

Модель 3D CAD отливки создается с учетом литейных уклонов, припусков, технологических пополнений, которые заложены в литейной оснастке. Чтобы обеспечить трансляцию сложной геометрии отливки «Рама боковая» из CAD в CAE, построение геометрии проводится по особой стратегии [106]. При симметричном расположении отливок в форме с целью экономии вычислительных ресурсов в расчете участвует четверть геометрической модели, ограниченная плоскостями симметрии (рисунок 4.2).

Поверхности исходной геометрической модели используются программой LVMFlow при симуляции технологии методом контрольных объемов, который учитывает расположение фрагментов поверхностей в ячейках расчетной сетки. Указанная особенность численного метода позволяет назначать менее 2 ячеек по толщине тонкой стенки. Вместе с тем, пробные симуляции показали, что для крупногабаритной тонкостенной

отливки оптимальным является размер ячейки, равный 50% значения минимальной толщины стенки отливки. Для отливки «Рама боковая» размер ячейки задан равным 8 мм. Соответственно, сетка для исходной технологии содержит 2 030 748 расчетных узлов, из них 108 858 узлов принадлежит отливке. Для выполнения расчетов на такой сетке требуется 1181.6 Мб памяти.

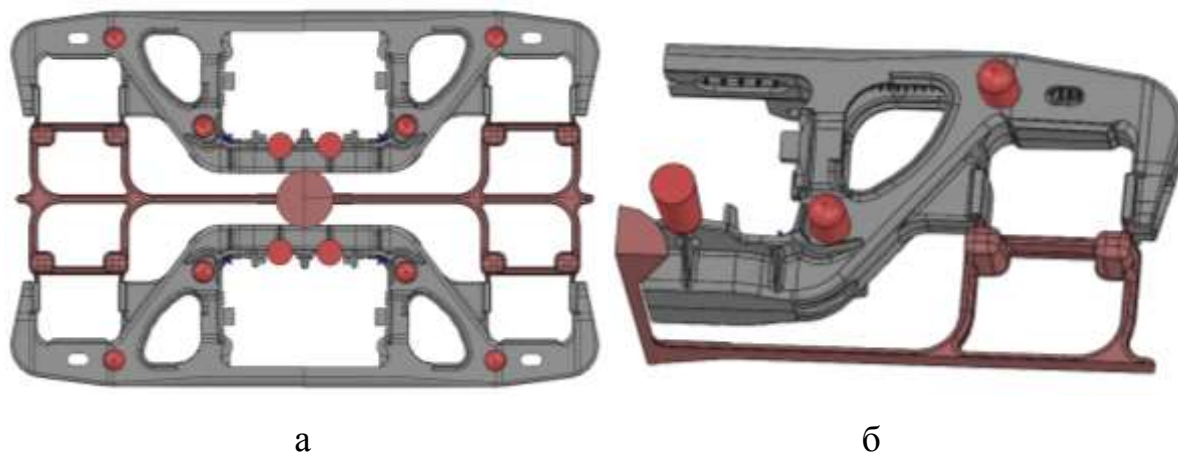


Рисунок 4.2 – Геометрическая модель отливки «Рама боковая» с литниковой системой и прибылями: полная модель (а) и усеченная модель с учетом плоскостей симметрии (б)

Для обеспечения точности расчетов на сетке заданы опции и настройки компьютерной модели в модулях LVMFlow. При сборке в геометрическом модуле задано расширение геометрических тел: 0.3 мм для литейной формы и 0.8 мм для фарфоровых вставок термопар. После генерации расчетной сетки в препроцессорном модуле закрыты зазоры с использованием встроенной функции редактирования. Без выполнения данных настроек в расчетной сетке выявляется более 2000 ошибок, которые препятствуют получению достоверных результатов в вычислительных экспериментах.

К начальным условиям компьютерной модели относится начальная температура расплава (1580°C), а также начальная температура формы (20°C). Холодильникам назначен материал «сталь 20Л» с начальной температурой 20°C . Для контроля за расчетными параметрами, включая температуру, в компьютерной модели после генерации расчетной сетки позиционированы виртуальные датчики (сенсоры).

Компьютерная модель содержит уточненные данные по свойствам материалов формы, которые обеспечивают более точное вычисление температурных полей на расчетной сетке. На рисунке 4.3 показаны в сравнении экспериментальные и расчетные температурные кривые с уточненными свойствами материала формы; графики соответствуют эксперименту по изготовлению отливки «Рама боковая», представленному на рисунках 3.9 и 3.10.

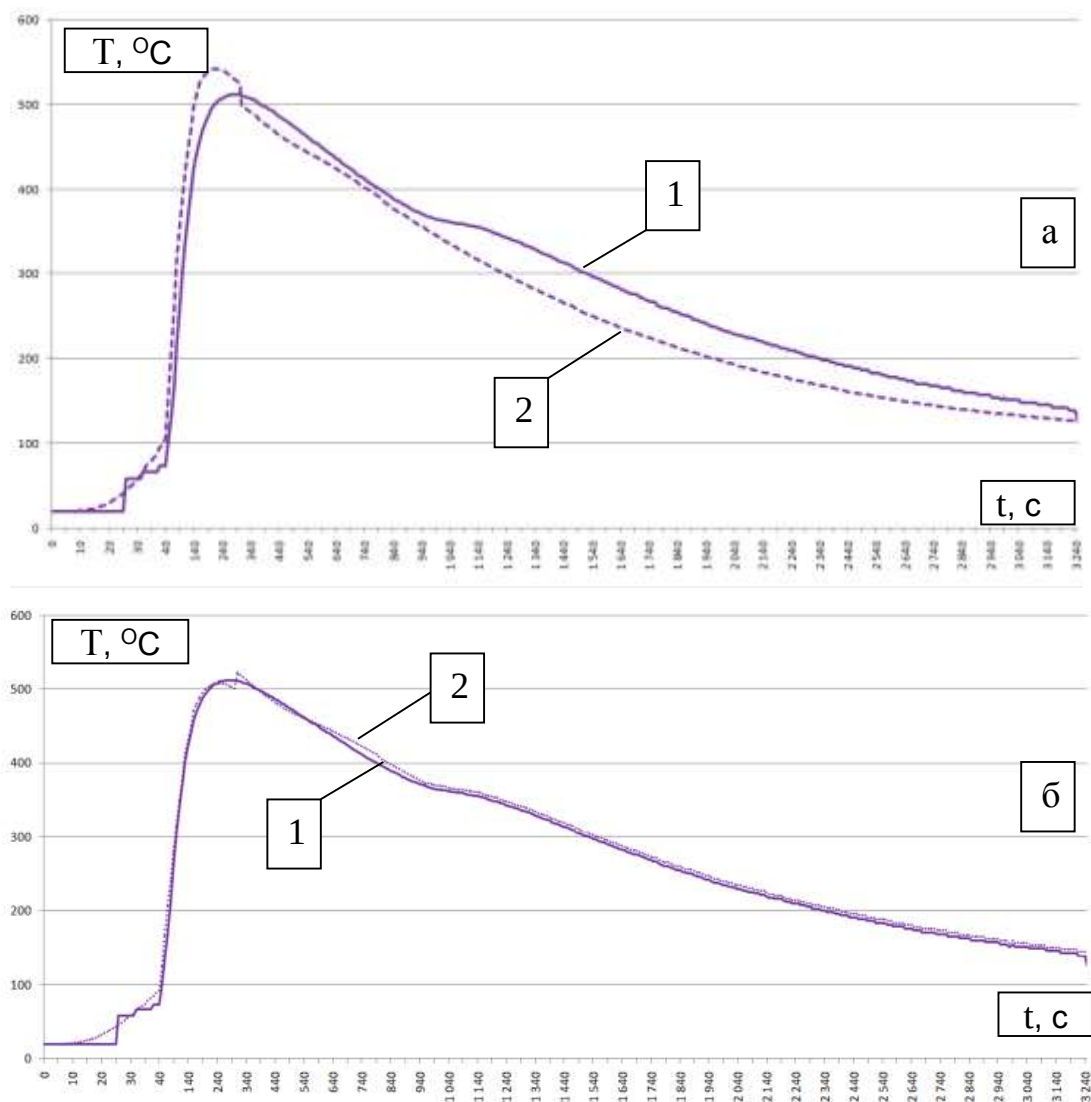


Рисунок 4.3 – Экспериментальные (1) и расчетные (2) температурные кривые при затвердевании отливки «Рама боковая» в песчано-глинистой форме с применением в компьютерной модели неуточненных (а) и уточненных (б) свойств материалов формы

До запуска задачи на расчет составляется список величин для регистрации и записи в файл результатов: температура, относительное содержание жидкой фазы (%), относительное содержание твердой фазы (%), параметр усадки. Отдельно выбираются для записи в текстовый файл расчетные результаты в точках установки сенсоров. Графическое представление расчетных параметров в сечении отливки «Рама боковая» представлено на рисунках 4.4 – 4.6.

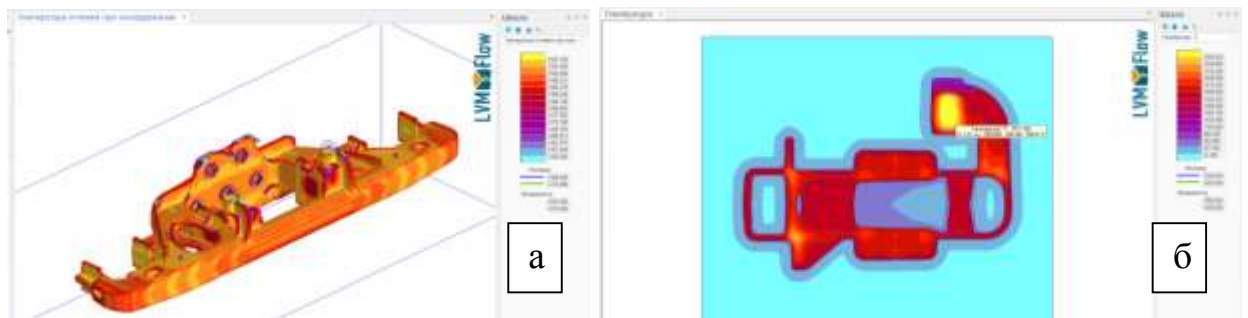


Рисунок 4.4 – Представление расчетного температурного поля на трехмерной модели (а) и в сечении (б) отливки «Рама боковая»

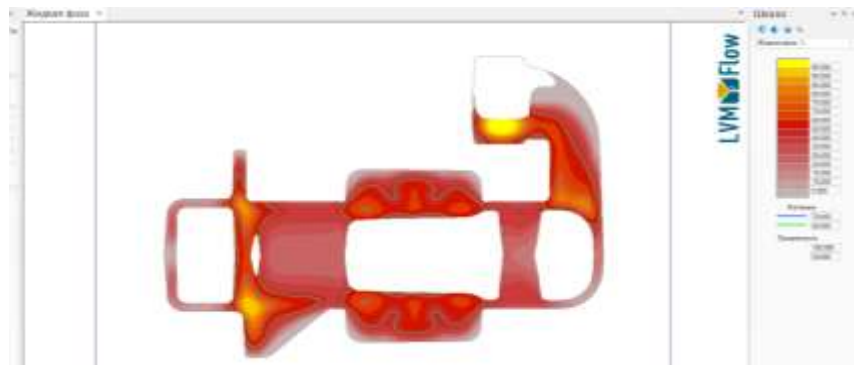


Рисунок 4.5 – Представление расчетного распределения жидкой фазы в сечении отливки «Рама боковая»

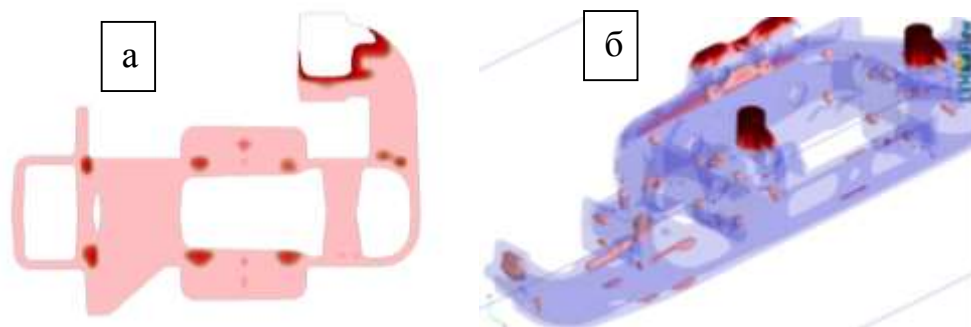


Рисунок 4.6 – Представление расчетного параметра усадки в сечении отливки «Рама боковая» (а), выделение зон с повышенной вероятностью образования усадки изопараметрическими поверхностями (б)

Прогнозируемые в программе LVMFlow усадочные дефекты можно транслировать на расчет прочности. Наши расчеты литой детали на прочность с использованием программного комплекса ANSYS показали [107], что наличие прогнозируемых в программе LVMFlow недопустимых усадочных дефектов может приводить к снижению коэффициента запаса по прочности преимущественно в опасных сечениях (рисунок 4.7).

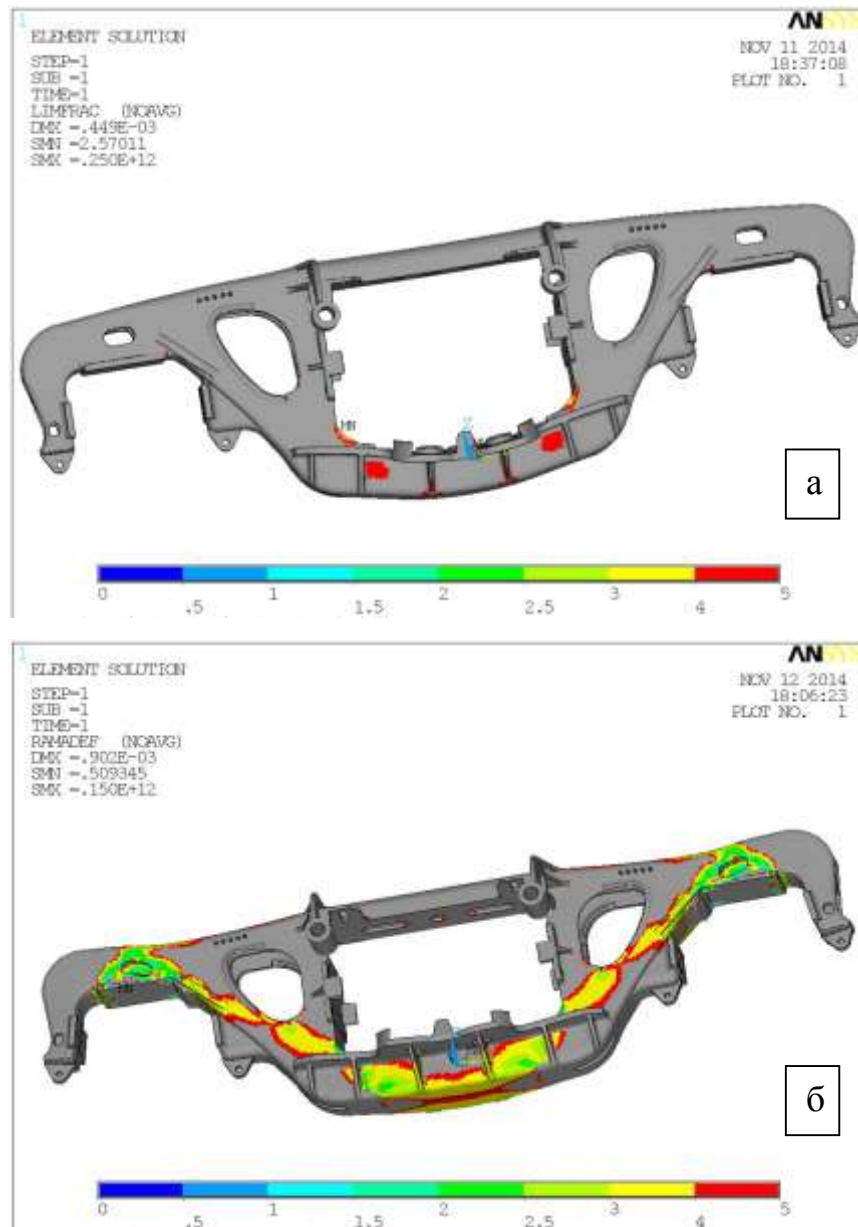


Рисунок 4.7 – Коэффициент запаса по прочности литой детали без учета усадочных дефектов (а) и с учетом зон усадочных дефектов (б)

4.2 Влияние технологических условий на образование дефектов в крупногабаритных тонкостенных стальных отливках

К факторам, которые могут повлиять на появление усадочных дефектов в крупногабаритных тонкостенных стальных отливках, но не могут подвергаться изменениям при проектировании литейной оснастки и технологии литья, относятся: технологически сложная конструкция литой детали с переменной толщиной стенок и коробчатыми сечениями, неконцентричность внутренних и внешних радиусов в коробчатых сечениях. Такие усложняющие элементы конструкции способствуют образованию тепловых узлов, которые трудно пропитать при затвердевании отливки.

К факторам, которые влияют на качество отливки и могут подвергаться изменению при усовершенствовании технологии литья, относятся: температура и время заливки; тип формовочной смеси; литниковая система; размер, расположение и геометрия прибылей, изолирующие оболочковые прибыльные вставки; экзотермические материалы; холодильники; технологические ребра.

Влияние различных факторов на образование дефектов исследовано в вычислительных экспериментах с использованием компьютерной модели, обеспечивающей точное вычисление температуры при затвердевании крупногабаритной тонкостенной стальной отливки в песчаной форме.

4.2.1 Влияние свойств материала формы на точность прогнозирования усадочных дефектов

Исследованию был подвергнут вариант технологии изготовления отливки «Балка надрессорная», который применялся в цехе крупного стального литья УВЗ. Заливка по данному варианту технологии производилась с одного из торцов отливки (рисунок 4.15). Изготовление форм производилось на формовочных машинах встряхивающего типа, формы изготавливались из песчано-глинистой смеси, стержни изготавливались по cold-box-amin процессу.

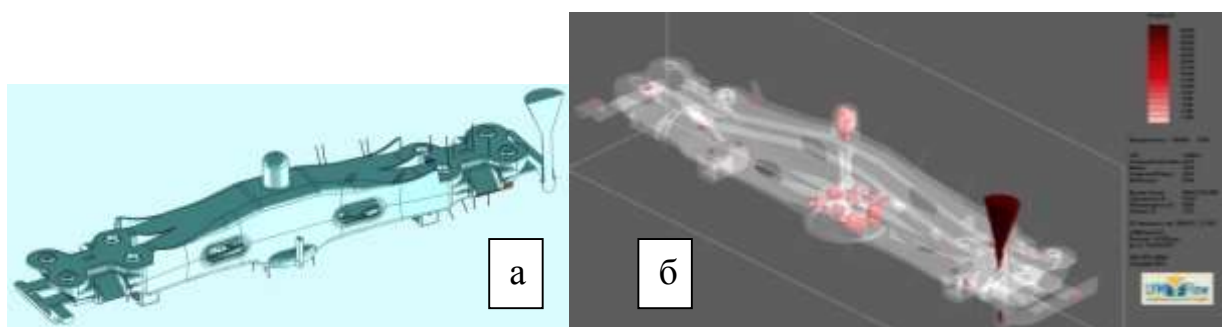


Рисунок 4.15 – Компьютерная модель (а) и результат моделирования усадочных дефектов (б) в отливке «Балка надрессорная»

На рисунке 4.16 результаты исследования усадочных дефектов в подпятниковой зоне отливки «Балка надрессорная» [109] показаны в сравнении с прогнозом компьютерного моделирования в программе LVMFlow. Расчетные результаты получены с данными о свойствах материалов из базы программы по умолчанию и с уточненными свойствами формовочной смеси.

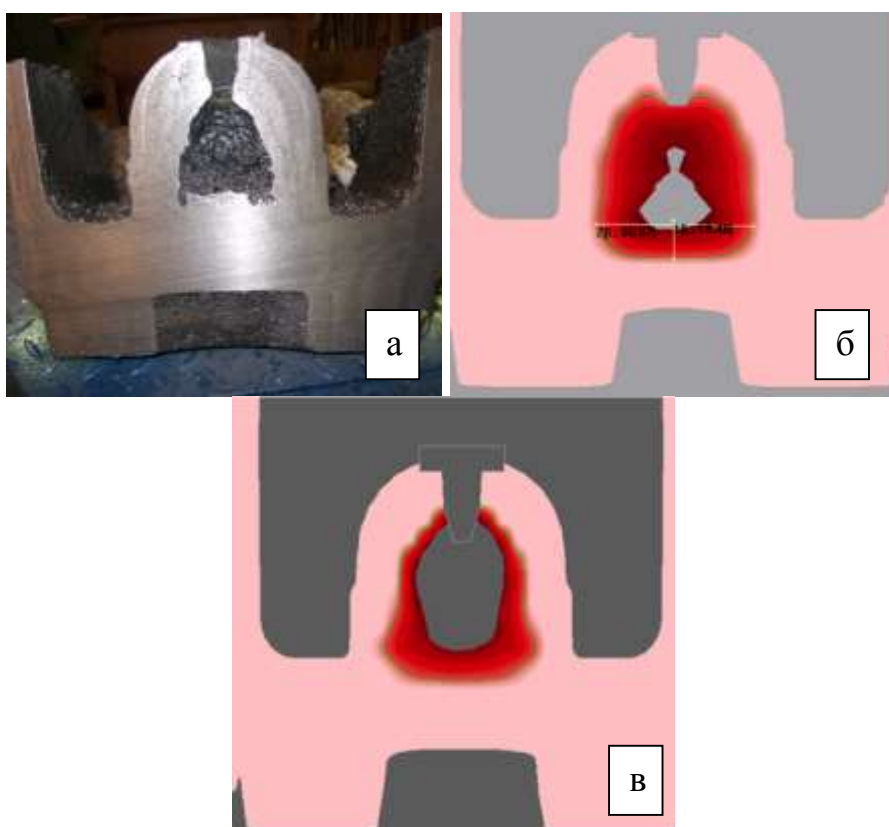


Рисунок 4.16 – Усадочная раковина в сечении подпятниковой зоны отливки «Балка надрессорная»: фактическая (а) и спрогнозированная конфигурация раковины при использовании неуточненной (б) и уточненной (в) базы данных формовочных материалов

Компьютерная модель с уточненными свойствами формовочных материалов дает более точное совпадение программных прогнозов с экспериментально наблюдаемой конфигурацией усадочной раковины, ее расположением и размерами.

4.2.2 Влияние параметров заливки на время заполнения расплавом формы

С использованием компьютерной модели для отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная» исследовано влияние температуры заливаемого металла с шагом в 10°C в диапазоне от 1580°C до 1560°C , а также количества металла в стопорном ковше с шагом в 5 т в диапазоне от 30 т до 10 т на процесс заполнения расплавом формы. Указанные параметры заливки оказывают влияние на динамику заполнения формы расплавом и образование технологических дефектов типа недолив.

Геометрическая модель отливки «Рама боковая» с литниково-питающей системой представлена на рисунке 4.17. Размерные параметры модели: верхний диаметр стояка – 70 мм; нижний диаметр стояка – 60 мм; высота стояка – $250+70$ мм; нижний диаметр воронки – 50 мм; верхний диаметр воронки – 205 мм; высота воронки – 226 мм; диаметр выходного отверстия ковша – 35 мм. Материал формы – песчано-глинистая смесь. Результаты симуляций сведены в таблицу 4.1. и представлены графиками на рисунке 4.18.

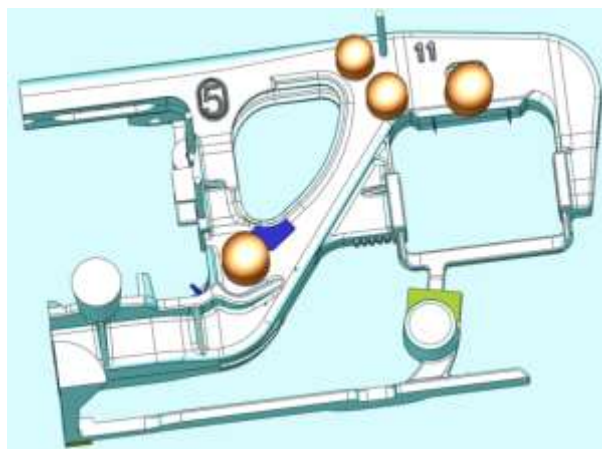


Рисунок 4.17 – Геометрическая модель отливки «Рама боковая» для симуляции процессов заполнения формы расплавом

Таблица 4.1 – Зависимость времени заполнения (с) формы от объема металла в ковше при различных температурах заливки для отливки «Рама боковая»

Объем металла в ковше, т \ Температура заливки, °C	30	25	20	15	10
1560	26,3	28,9	32,1	37,3	46,5
1570	26,3	28,7	32,1	37,6	46,2
1580	26,1	28,6	32,1	37,3	46,2

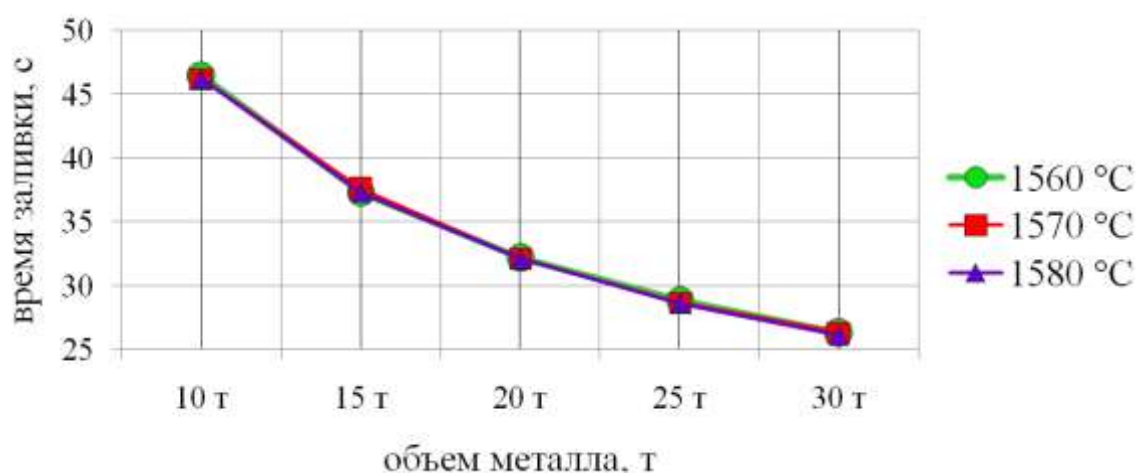


Рисунок 4.18 – Графики зависимости времени заполнения формы от объема металла ковше с температурой 1560°C-1580°C для отливки «Рама боковая»

Аналогичные симуляции технологии выполнены для отливки «Балка надressорная» (рисунок 4.19).

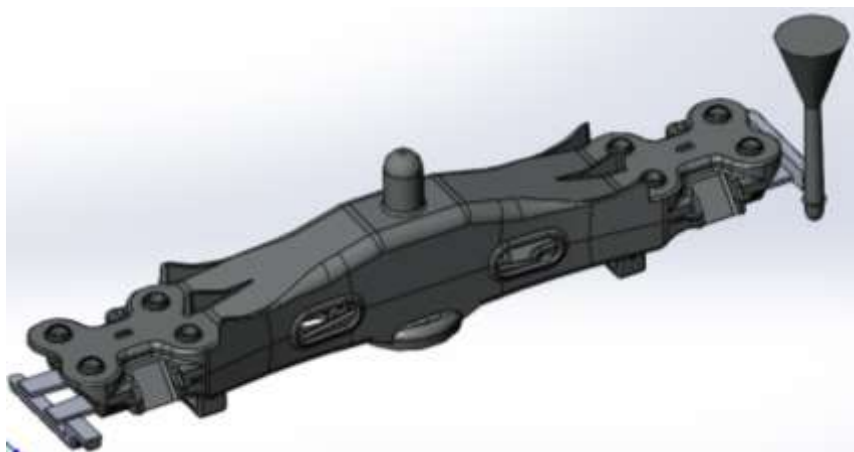


Рисунок 4.19 – Геометрическая модель отливки «Балка надressорная» для симуляции процессов заполнения формы расплавом

Результаты симуляций для отливки «Балка надressорная» сведены в таблицу 4.2. и представлены графиками на рисунке 4.20. Размерные параметры

модели: диаметр стояка – 50 мм; высота стояка – 300 мм; нижний диаметр воронки – 50 мм; верхний диаметр воронки – 205 мм; высота воронки – 226 мм; диаметр выходного отверстия ковша – 35 мм. Материал формы – песчано-глинистая смесь.

Таблица 4.2 – Зависимость времени заливки (с) формы от объема металла в ковше при различных температурах заливки для отливки «Балка надрессорная»

Объем металла в ковше, т	30	25	20	15	10
Температура заливки, °C					
1560	28,6	31,4	35,2	40,9	51,2
1570	28,9	31,7	35,2	40,9	51,1
1580	28,9	31,7	35,2	40,9	50,9

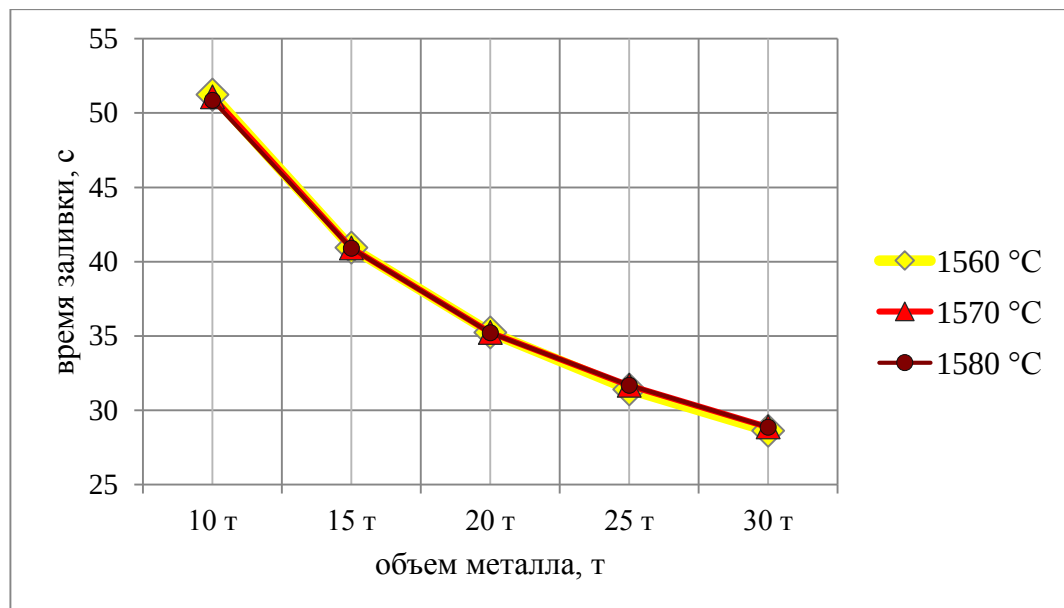


Рисунок 4.20 – Графики зависимости времени заполнения формы от объема металла ковше с температурой 1560°C-1580°C для отливки «Балка надрессорная»

В вычислительных экспериментах исследовано влияние диаметра стопорного отверстия на время заполнения формы из песчано-глинистой смеси расплавом. Параметры симуляций: температура заливки 1580°C; диаметр выходного отверстия ковша – 35 мм и 40 мм; объем металла в ковше – от 10 до 30 т с шагом 5 т. Для отливки «Рама боковая» результаты симуляций

сведены в таблицу 4.3 и представлены графиками на рисунке 4.21. Для отливки «Балка надрессорная» результаты симуляций сведены в таблицу 4.4 и представлены графиками на рисунке 4.22.

Таблица 4.3 – Зависимость времени заполнения (с) формы от объема металла в ковше при различных диаметрах выходного отверстия ковша для отливки «Рама боковая»

$\varnothing$ ВЫХ. ОТВ., ММ	35	40
Масса расплава, т		
10	46,2	41,2
15	37,3	33,4
20	32,1	28,6
25	28,6	24,6
30	26,8	22,7

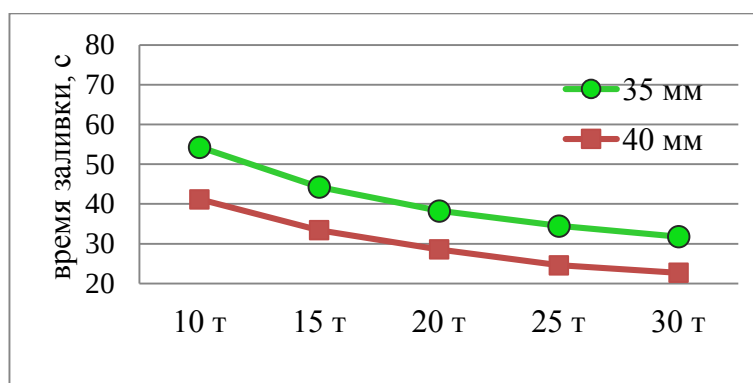


Рисунок 4.21 – Графики зависимости времени заполнения формы от объема металла ковше при диаметрах выходного отверстия ковша 35 и 40 мм для отливки «Рама боковая»

Таблица 4.4 – Зависимость времени заполнения (с) формы от объема металла в ковше при различных диаметрах выходного отверстия ковша для отливки «Балка надрессорная»

$\varnothing$ ВЫХ. ОТВ., ММ	35 ММ	40 ММ
Масса расплава, т		
10	65,0	48,2
15	50,8	38,9
20	43,8	33,6
25	39,1	29,9
30	35,7	27,4

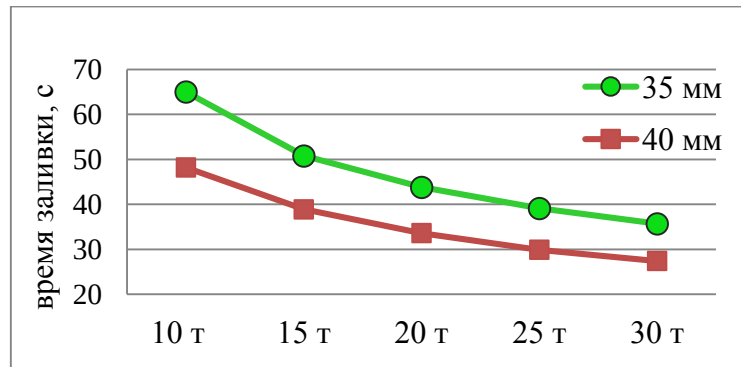


Рисунок 4.22 – Графики зависимости времени заполнения формы от объема металла ковше при диаметрах выходного отверстия ковша 35 и 40 мм для отливки «Балка надрессорная»

Таким образом, установлены следующие закономерности:

- температура заливки в разрешенном диапазоне температур практически не оказывает влияния на время (скорость) заполнения песчано-глинистой формы расплавом;
- наибольшее влияние на время (скорость) заполнения формы оказывает количество металла в стопорном ковше: чем меньше металла в ковше, тем ниже скорость заливки;
- при диаметре выходного отверстия стопорного ковша $\varnothing_{\text{вых. отв. ковша}} = 40$ мм, время заливки сокращается по сравнению с $\varnothing_{\text{вых. отв. ковша}} = 35$ мм на 25 % для отливки «Балка надрессорная» и на 10-15 % для отливки «Рама боковая».

Из выявленных закономерностей можно выбрать оптимальные параметры, в частности, предпочтительным является диаметр выходного отверстия стопорного ковша $\varnothing_{\text{вых. отв. ковша}} = 35$ мм, при котором понижается вероятность размыва формы из песчано-глинистой смеси потоком.

4.2.3 Влияние литниковой системы на процесс заполнения формы расплавом

С целью оценки влияния различных типов литниковых систем (ЛС) на время заполнения литейной формы и характер течения расплава проведены вычислительные эксперименты с отливками «Рама боковая» и «Балка надрессорная».

Для отливки «Рама боковая» сравнению подвергнуты:

- 1) ЛС, применяемая в серийном производстве;
- 2) ЛС с увеличенными площадями сечения питателей;
- 3) сифонная ЛС;
- 4) ЛС, собранная из стандартных керамических изделий; а также
- 5) заливка из специального заливочного приспособления.

Расчетные параметры процесса для отливки «Рама боковая» сведены в таблицу 4.5; соответствующие результаты симуляции процессов заполнения песчано-глинистой формы расплавом показаны скриншотами рабочего окна программы LVMFlow на рисунке 4.23, где зафиксирован момент выхода расплава из литниковой системы в полость отливки. Красным цветом отмечены зоны с высокой скоростью течения расплава.

Таблица 4.5 – Расчетные параметры заливки в зависимости от типа ЛС для отливки «Рама боковая»

Тип литниковой системы	Исходные параметры симуляции		Расчетные параметры процесса		
	Объем металла в ковше, т	Диаметр выпускного отверстия ковша, мм	Максимальная скорость металла на входе в полость отливки, м/с	Момент выхода металла из ЛС, с	Время заполнения формы, с
Серийная ЛС	25	35	0,83	2,3	31,8
Серийная ЛС с увеличенными площадями сечений питателей	25	40	0,86	2,1	21,7
Сифонная ЛС	25	35	0,99	0,5	26,8
ЛС из стандартных керамических изделий	25	35	1,06	0,8	27,1
Заливка из специального заливочного приспособления	25	40	0,66	2,7	22,7

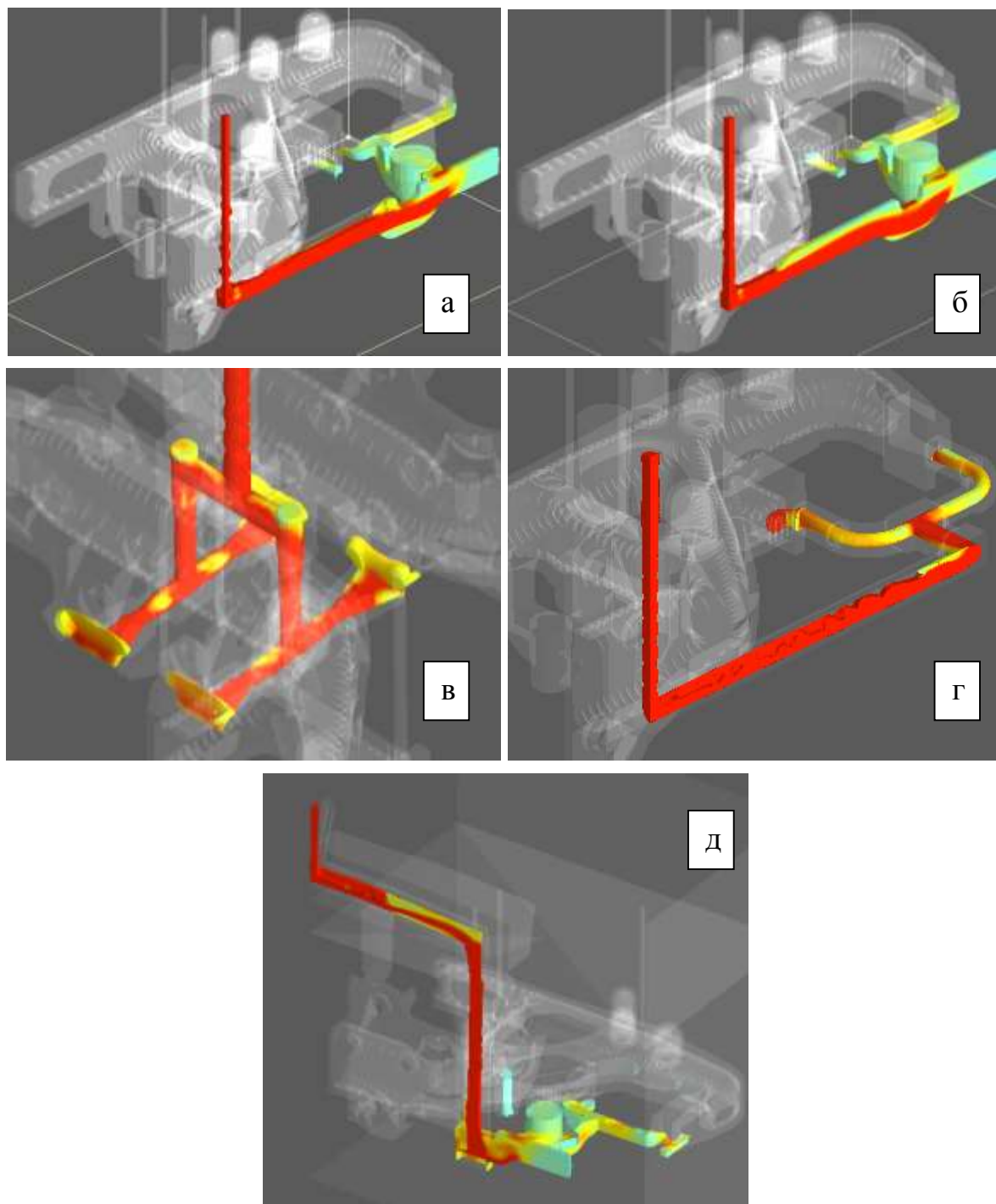


Рисунок 4.22 – Распределение скорости течения расплава в литниковой системе для отливки «Рама боковая» в момент входа металла в полость отливки: серийная ЛС (а);
 ЛС с увеличенными площадями сечения питателей (б);
 сифонная ЛС (в);
 ЛС из стандартных керамических изделий (г);
 заливка из специального заливочного приспособления (д)

Для отливки «Балка надрессорная» сравнению подвергнуты:

- 1) ЛС, применяемая в серийном производстве;
- 2) ЛС с увеличенным диаметром стояка (60 мм);
- 3) ЛС с питателями в каждом торце отливки;
- 4) ЛС, собранная из стандартных керамических изделий.

Расчетные параметры процесса для отливки «Балка надрессорная» сведены в таблицу 4.6; соответствующие результаты симуляции процессов заполнения литейной формы расплавом показаны скриншотами рабочего окна программы LVMFlow на рисунке 4.24, где зафиксирован начальный период входа расплава из литниковой системы в полость отливки.

Таблица 4.6 – Расчетные параметры заливки в зависимости от типа ЛС для отливки «Балка надрессорная»

Тип литниковой системы	Исходные параметры симуляции		Расчетные параметры процесса		
	Объем металла в ковше, т	Диаметр отверстия ковша, мм	Максимальная скорость металла на входе в отливку, м/с	Момент выхода металла из ЛС, с	Время заполнения формы, с
Серийная ЛС	25	35	1,8	0,7	34,8
ЛС с увеличенным диаметром стояка (60 мм)	25	40	2,2	0,6	20,5
ЛС с питателями на каждом торце детали	25	40	1,3	2,0	21,5
ЛС из стандартных керамических изделий	25	35	2,4	0,5	31,6

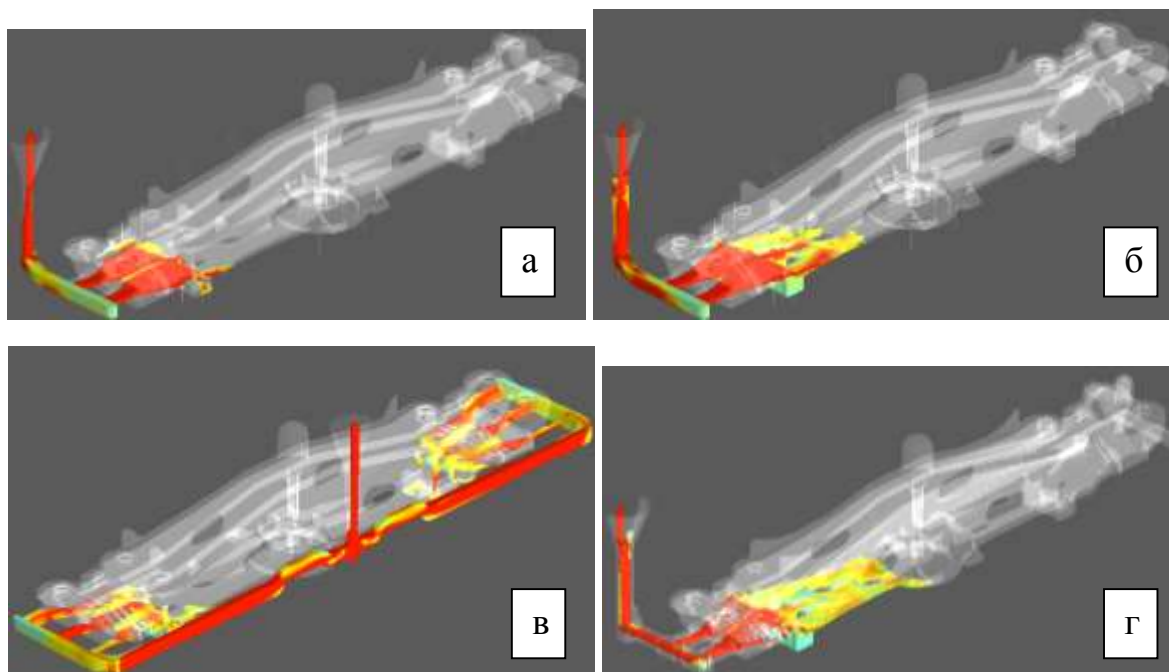


Рисунок 4.24 – Распределение скорости течения расплава в литниковой системе для отливки «Балка надрессорная» в начальный период входа металла в полость отливки: серийная ЛС (а); ЛС с увеличенным диаметром стояка; ЛС с питателями в каждом торце детали (в); ЛС из стандартных керамических изделий (г)

Таким образом, установлены следующие закономерности процесса заполнения литейной формы металлом:

- тип литниковой системы и места подвода металла влияют на скорость течения расплава;
- для отливки «Рама боковая» наименьшая скорость течения расплава на выходе из литниковой системы обеспечивается при использовании серийной ЛС;
- для отливки «Рама боковая» удовлетворительная скорость течения расплава на входе в полость отливки обеспечивается при использовании специального заливочного приспособления для заливки формы через два стояка одновременно;
- для отливки «Балка надрессорная» наименьшая скорость течения расплава на входе в полость отливки обеспечивается при использовании ЛС с питателями в каждом торце отливки.

4.3 Выводы по главе 4

1. На базе отечественного программного обеспечения САПР литейной технологии LVMFlow создана компьютерная модель процессов затвердевания крупногабаритных тонкостенных стальных отливок в песчаных литейных формах. Созданная компьютерная модель обеспечена верифицированными препроцессорными настройками и уточненными входными данными о теплофизических свойствах материалов формы. Верификация компьютерной модели проведена путем сравнения экспериментальных и расчетных температурных полей, а также – реальных и прогнозируемых усадочных дефектов.

2. С применением созданной компьютерной модели проведены вычислительные эксперименты и выявлены закономерности процессов заполнения расплавом литейной формы для крупногабаритных тонкостенных стальных отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная» в зависимости от параметров заливки и типа литниковой системы.

3. Температура заливки в пределах допустимого технологического интервала 1560-1580 °С не оказывает влияния на характер заполнения формы расплавом.

4. Изменение количества металла в стопорном ковше влияет на изменение скорости заполнения формы. В конце разливки скорость падает до 47% от начальной скорости. Увеличение диаметра выходного отверстия стопорного ковша с 35мм до 40мм дает в среднем увеличение скорости заливки формы на 20%.

5. Тип литниковой системы и места подвода металла влияют на скорость течения расплава в зоне выхода из ЛС в полость отливки; сравнением вычисленных значений скорости течения расплава определены оптимальные варианты литниковой системы для крупногабаритных тонкостенных стальных отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная».

ГЛАВА 5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК «РАМА БОКОВАЯ» И «БАЛКА НАДРЕССОРНАЯ»

В пятой главе представлены результаты совершенствования технологии изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная» в условиях УВЗ с использованием верифицированной компьютерной модели и уточненных теплофизических свойств формовочных материалов. Особое внимание уделено устранению усадочных дефектов, образование которых зависит от изменяющегося температурного поля и может быть точно предсказано на этапе проектирования технологической оснастки при условии, что симуляция технологического процесса выполняется с использованием корректной компьютерной модели и уточненных теплофизических свойств материалов.

5.1 Технологические особенности исходного способа изготовления крупногабаритных вагонных отливок

За исходный вариант в данной работе была взята традиционная технология изготовления отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная» в песчано-глинистой форме. До введения ГОСТ 32400-2013 для проверки качества отливок использовался разрушающий метод контроля огневой резкой. При порезке газовым резаком многие дефекты заплавливались и не попадали в статистику по браку. После введения ГОСТ 32400-2013 ужесточились требования к отливкам, поэтому в изготовлении оснастки перешли на ХТС стержни, и был введен современный способ разрушающего контроля порезкой на пилах. Как следствие, было зафиксировано увеличение брака, и возникла необходимость в корректировке технологии.

Специалисты УВЗ, следуя современным направлениям в области формообразования, произвели реконструкцию цеха крупного стального вагонного литья с установкой безопочной формовочной линии в составе комплекса безопочного формовочного и высокопроизводительного

стержневого оборудования фирмы IMF, Италия (рисунок 5.1) для изготовления отливок «Балка надрессорная» и «Рама боковая» с использованием холодно-твердеющих смесей.

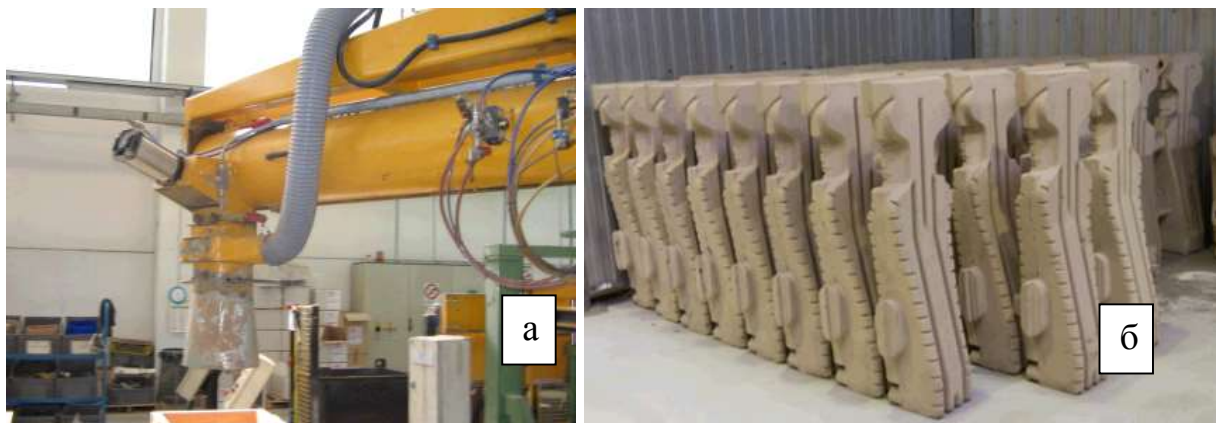


Рисунок 5.1 – Комплекс безопасного формовочного и стержневого оборудования фирмы IMF в цехе крупного стального литья УВЗ: смеситель непрерывного действия (а), готовые стержни (б)

Производительность формовочного оборудования обеспечивает получение 12000 вагонокомплектов в год. Современные стержни ХТС дают ряд преимуществ при изготовлении крупногабаритных тонкостенных стальных отливок, включая более гладкую поверхность и в итоге – более высокое качество деталей.

Вместе с тем, после запуска нового оборудования сводки по заводскому браку демонстрируют неудовлетворительное качество отливок. Отбраковка по литым деталям достигала 28 % для боковых рам и 37 % для надрессорных балок. В отливках обнаружены многочисленные технологические дефекты, представленные на рисунке 5.2, включающие усадочные раковины, газоусадочную пористость, горячие трещины, засоры. На рисунке 5.3 столбчатыми диаграммами показан общий уровень брака отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная» в условиях УВЗ.

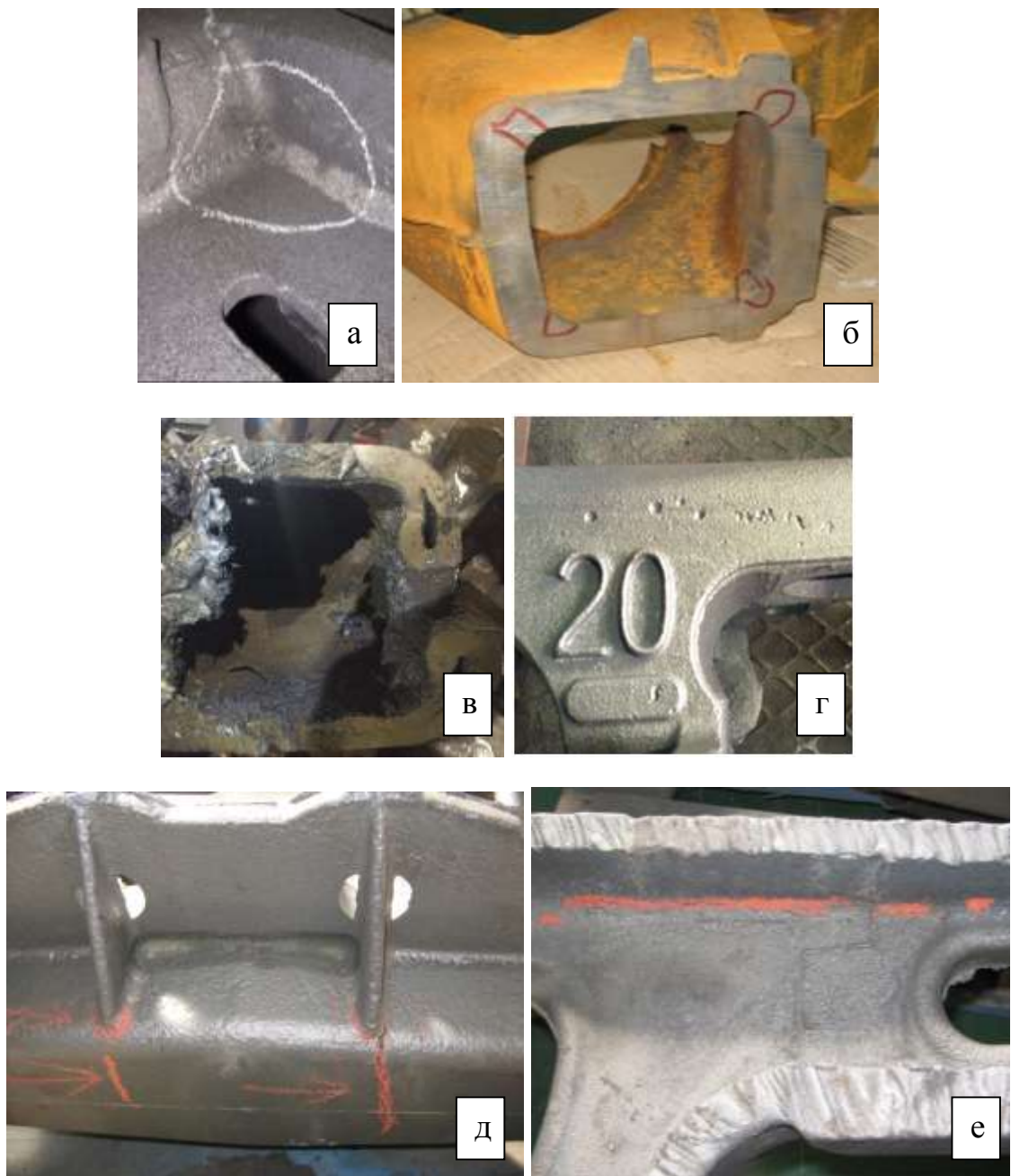


Рисунок 5.2 – Литейные дефекты в исходном варианте технологии изготовления отливки «Рама боковая»: газоусадочная пористость (а, б), усадочные раковины (в), засор на наружной поверхности по верхнему поясу отливки (г), горячие трещины (д, е)

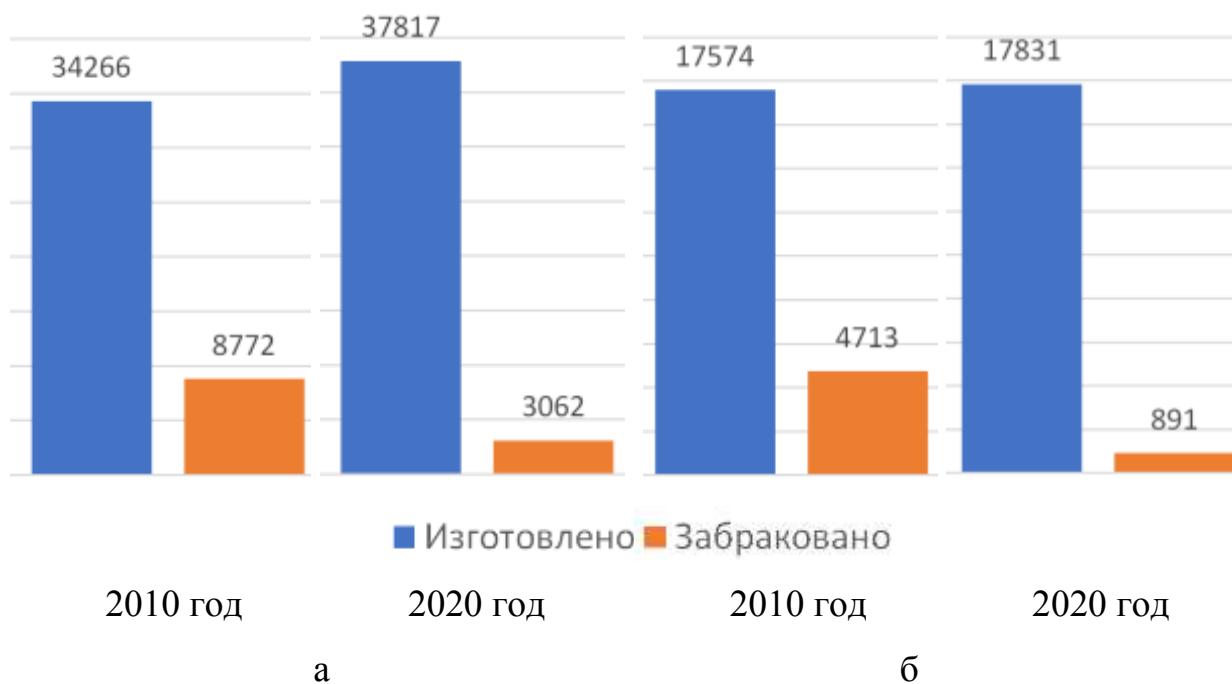


Рисунок 5.3 – Количество изготовленных в условиях УВЗ и забракованных отливок «Рама боковая» (а) и «Балка надрессорная» (б)

В таблице 5.1 приведены данные об относительном вкладе различных литейных дефектов в общий объем брака при изготовлении крупногабаритных стальных отливок в условиях УВЗ. Данные таблицы 5.1 представлены графически круговыми диаграммами на рисунке 5.4.

Таблица 5.1 – Распределение по видам брака литых деталей «Рама боковая» и «Балка надрессорная» в условиях УВЗ

Литая деталь	Виды брака					Общий брак, %
	Усадка, %	Засор, %	Недолив, %	Искаженный размер, %	Прочие, %	
2010 год						
Рама боковая	36	24	17	11	12	25,6
Балка надрессорная	42	22	16	12	8	24,5
2020 год						
Рама боковая	3	25	27	10	35	8,1
Балка надрессорная	4	21	24	14	37	5

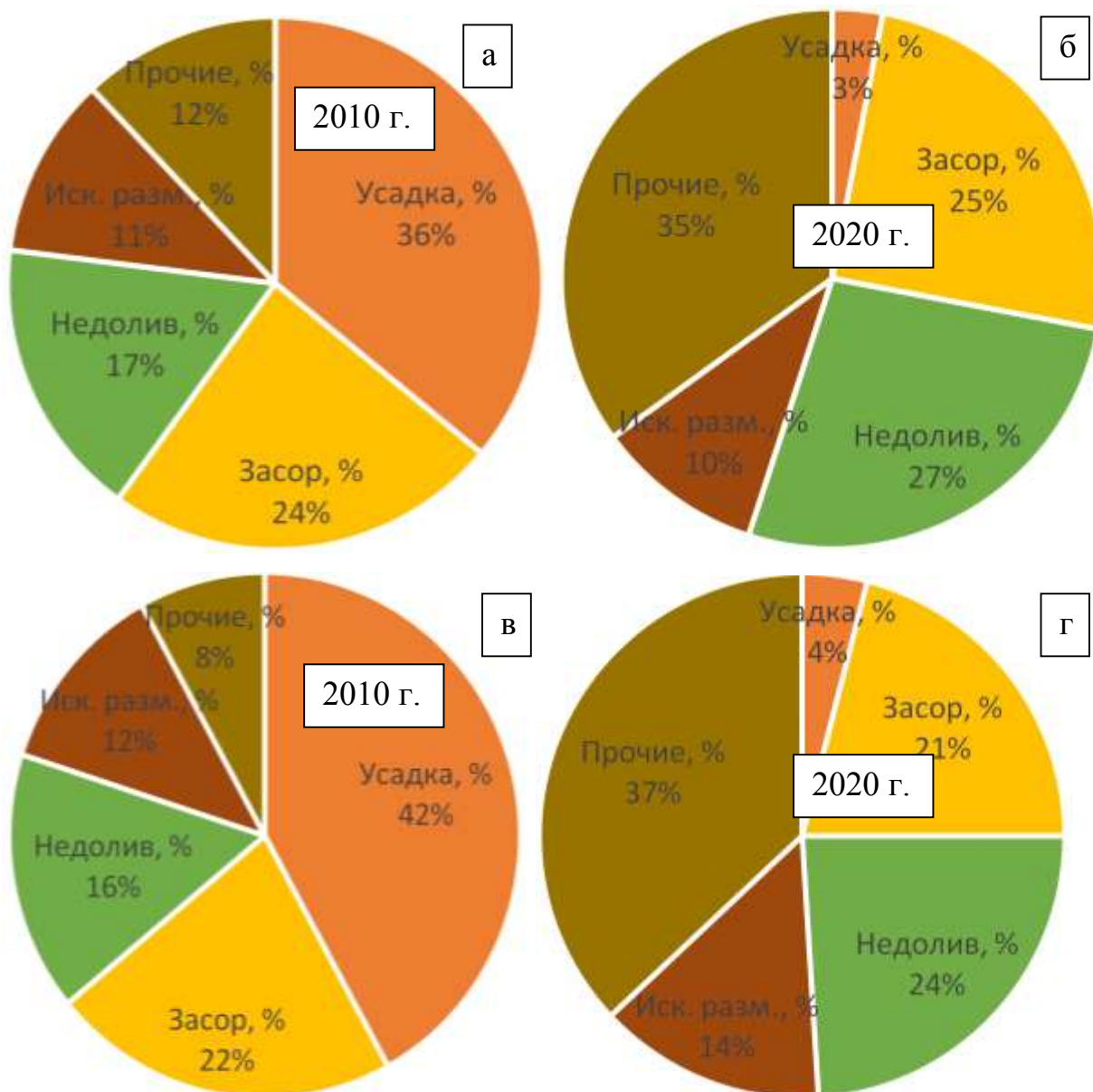


Рисунок 5.4 – Распределение по видам брака отливок «Рама боковая» (а, б) и «Балка надрессорная» (в, г), изготовленных в условиях УВЗ в 2010 г. (а, в) и в 2020 г. (б, г)

Исходя из приведенных данных, технологии изготовления отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная» в данной работе подвергнуты усовершенствованию для снижения брака по усадочным дефектам.

При совершенствовании исходной технологии варианты изменения существующих технологических параметров и операций были ограничены геометрическими особенностями литых деталей, нормативными документами и возможностями установленного дорогостоящего оборудования. Так, исходя из геометрии самой отливки и особенностей формовки, линию разъема формы

необходимо оставить неизменной. Без изменений следует также оставить расположение отливки в форме, поскольку от положения отливок при заливке и поверхности разъема форм существенно зависит качество и трудоемкость изготовления отливок.

Отливки в форме располагаются таким образом, чтобы обеспечить направленное затвердевание металла, и как следствие, – минимальный расход металла на прибыли и получение отливок без внутренних усадочных раковин. Положение отливки при заливке и поверхность разъема формы выбираются из расчета применения минимального количества стержней, что снижает трудоемкость изготовления отливки, при этом уменьшается количество заливок и улучшается качество литых деталей.

Повышенная склонность крупногабаритных тонкостенных отливок к образованию трещин [110] требует применения наиболее податливых форм и стержней. Для обеспечения необходимой податливости форм в традиционной технологии применяют заливку по-сырому. Применение сырых форм обеспечивает выпуск отливок, стоимость которых значительно ниже стоимости таких же отливок, изготавливаемых заливкой в сухие формы.

В традиционной технологии сырые стержни применяют в основном для получения наружных поверхностей отливок, а комбинированные стержни (сырые стержни, спаренные с сухими) – для внутренних поверхностей отливок. Комбинированные стержни устанавливают в форму таким образом, что всю нагрузку от собственного веса воспринимают и передают форме нижние, сухие стержни. Сырой стержень, имеющий низкую прочность, располагается поверх сухого; такое расположение предохраняет сырой стержень от разрушения. Применение сырых и комбинированных стержней гарантирует получение сложных тонкостенных отливок без трещин и позволяет более тщательно заделывать стык между формой и стержнем. Тщательная заделка стыков обеспечивает получение отливок без заливок по этим стыкам. Значительно уменьшаются также заливки между сырой формой и сухими стержнями, поскольку установка знаков стержней в знаки формы

осуществляется плотно, с минимальными зазорами 0,5 мм. В свою очередь, уменьшение заливов снижает трудоемкость обрубных работ и брак по трещинам, возникающим в местах заливов на тонкостенных отливках.

Применение сырых форм также способствует уменьшению пригара. Интенсивное охлаждение металла при соприкосновении с сырой формой приводит к быстрому образованию на поверхности отливки твердой корочки металла, которая в дальнейшем препятствует проникновению жидкого металла в поры формы. Поэтому, как правило, поверхность крупногабаритных стальных отливок чистая. Отдельные участки отливок с небольшим пригаром легко очищаются в дробеструйных камерах.

С целью предупреждения брака отливок по засорам и ужиминам (рисунок 5.5) особое внимание уделяется укреплению поверхности форм и стержней. С целью увеличения поверхностной прочности формы, применяются облицовочные жидкостекольные смеси, теплофизические свойства которых уточнены в рамках данной диссертационной работы.



Рисунок 5.5 – Дефект ужимина на отливке «Рама боковая»

Части форм, подвергающиеся в процессе заливки наибольшему воздействию потока металла, для увеличения поверхностной прочности укрепляются толевыми гвоздями длиной 30 мм и диаметром 3 мм. Шаг установки гвоздей составляет 25-30 мм. К таким местам относятся литниковые ходы, питатели и части форм, близкие к питателям. Предохранение от разрушения выступающих частей форм производится укреплением их

формовочными гвоздями длиной 100-125 мм и диаметром 1,6-1,8 мм. Такими гвоздями укрепляются выступающие части, если их высота не превышает 70-80 мм. Для предотвращения обвала более массивных выступающих частей верхних полуформ в них дополнительно устанавливают проволоочные каркасы. Для увеличения прочности большие горизонтальные поверхности форм и стержней изготавливаются с рифлением.

Для предупреждения раздутия и обвала форм после уплотнения встряхиванием выполняется дополнительное уплотнение смеси подтрамбовкой. Предупреждение раздутия форм и прорыва жидкого металла обеспечивается также установкой собранных форм на постель из горелой смеси, которая устраивается на заливочных плитах. Толщина постели составляет 30-40 мм, а влажность горелой смеси должна быть не более 6%.

Исходная технология изготовления отливки «Балка надрессорная» включает использование машинной формовки в песчано-глинистые формы. Применяются комбинированные стержни. В форме расположено 2 отливки, пятниковым узлом вниз. Сверху на каждой из отливок установлена прибыль. Заливка производится с одного торца детали.

Недостатками традиционной технологии являются:

- невысокая стабильность геометрических размеров отливок, поскольку применяемые комбинированные стержни не позволяют обеспечить требуемую размерную точность;
- повышенный процент брака по дефектам типа засоров, поскольку песчано-глинистая форма подвергается размывающей силе потока жидкого металла;
- высокая трудоемкость изготовления формы и стержней из-за большого количества операций, выполняемых вручную.

Распределение основных расчетных параметров (температура, жидкая фаза, твердая фаза, усадочные дефекты) для исходной технологии изготовления отливки «Балка надрессорная», применяемой в цехе крупного стального литья УВЗ, показано на рисунке 5.6.

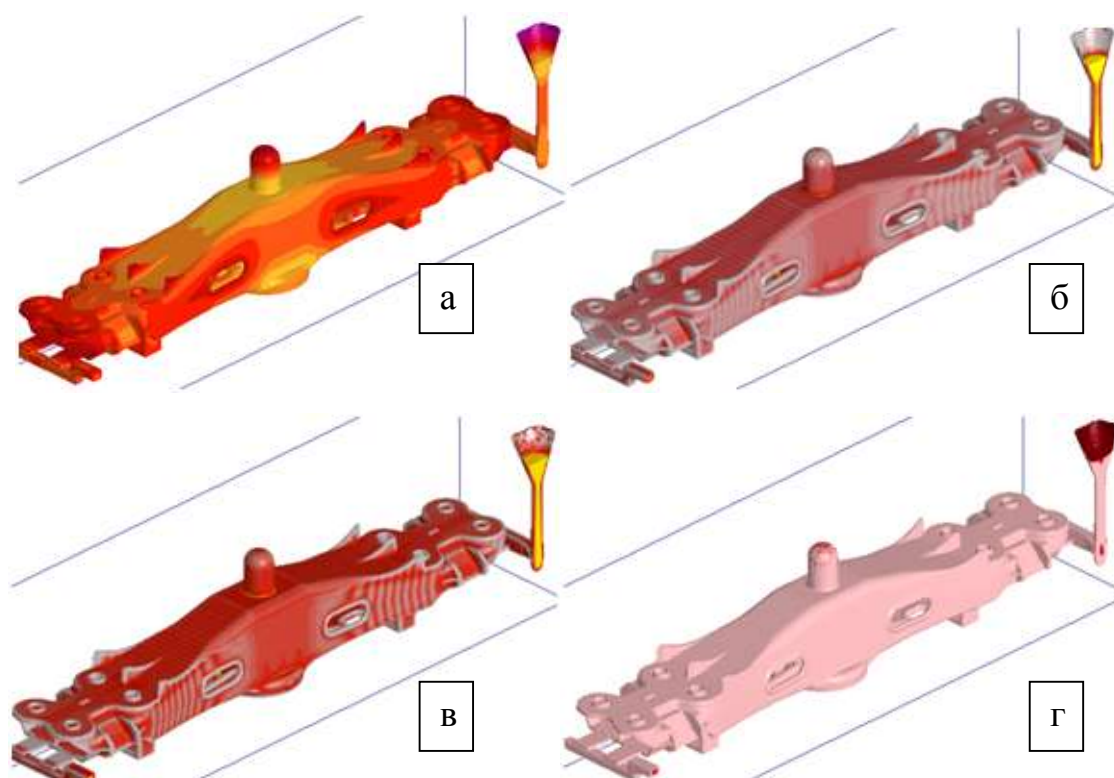


Рисунок 5.6 – Параметры, вычисленные в программной среде LVMFlow для исходной технологии изготовления отливки «Балка надрессорная»: температура (а), жидкая фаза (б), твердая фаза (в), усадочные дефекты (г)

Все перечисленные выше факторы определяют необходимость и актуальность совершенствования технологий изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная» с использованием методов компьютерного моделирования.

5.2 Разработка и исследование новых конструкций стержней-вставок для литейных прибылей

Одним из эффективных направлений устранения усадочных дефектов в отливке является совершенствование прибылей с целью максимального использования жидкого металла. При рассмотрении вариантов повышения эффективности работы классических закрытых прибылей, в технологии изготовления отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная», предложено использовать экзотермические стержни-вставки. Использование в конструкции прибыли стержня-вставки позволяет увеличить время работы прибыли и предотвратить преждевременное образование литой корки, что в

свою очередь, облегчает оседание металла в прибыли при объемной усадке и тем самым повышает результативность работы прибыли. Предлагаемая конструкция прибыли в сравнении с применяемой показана на рисунке 5.7.

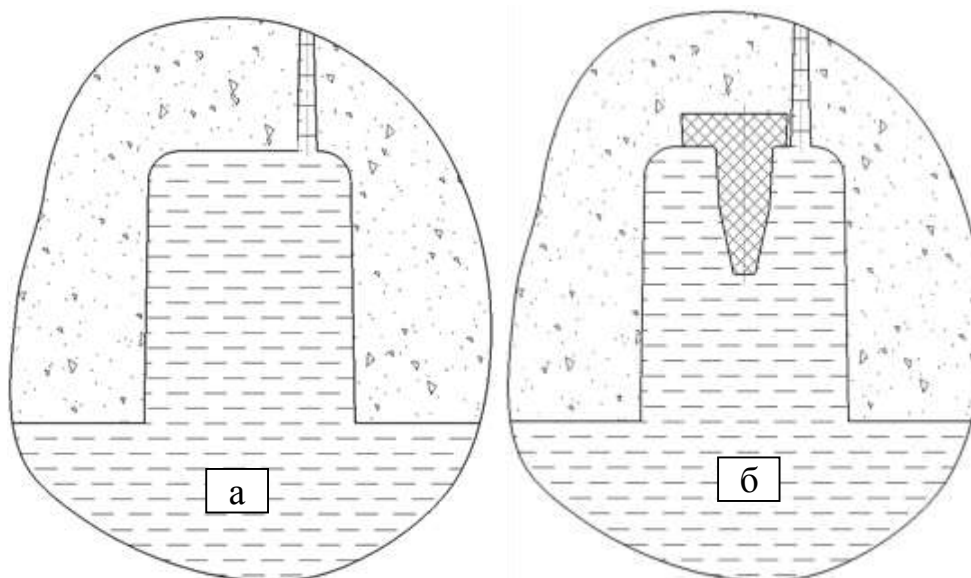


Рисунок 5.7 – Разрез литейной формы в зоне действия закрытых прибылей:

а) классическая конструкция прибыли; б) конструкция прибыли с применением экзотермического стержня-вставки.

Производителем экзотермических стержней-вставок является российская компания «Волокнистые огнеупоры», вставки изготавливаются осесимметричными, геометрия вставок представлена на рисунке 5.8.



Рисунок 5.8 – Осесимметричная геометрия экзотермических стержней-вставок производства компании «Волокнистые огнеупоры»

Практика использования экзотермических вставок с осесимметричной геометрией в условиях УВЗ показала, что имеют место случаи образования усадочных раковин в зоне работы прибылей с такими вставками. Поэтому

было принято решение исследовать и совершенствовать технологический процесс с применением экзотермических вставок. Конструктивно экзотермический стержень-вставка для литейных прибылей состоит из двух частей – погружной и удерживающей. Изменению подвергнута геометрия вставок, нами предложено заменить осесимметричную геометрию набором граней (рисунок 5.9) в погружной части экзотермического стержня-вставки с целью обеспечения более интенсивного прогрева жидкого металла.

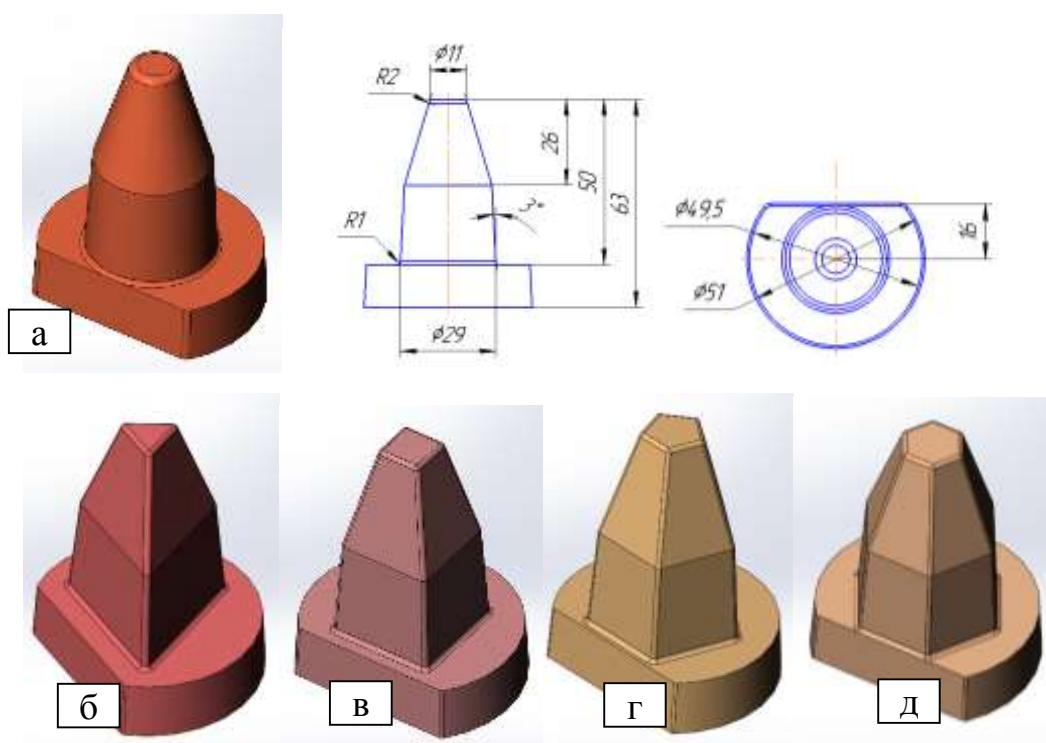


Рисунок 5.9 – Экзотермический стержень-вставка СТЭ 63-29 с осесимметричной геометрией и варианты конструкции с 3 (б), 4 (в), 5 (г), 6 гранями (д)

Предложение ввести грани объясняется тем, что вектор теплового потока направлен перпендикулярно граням погружной рабочей части. При этом в соответствии с температурным полем, вблизи ребер температура расплавленного металла оказывается выше. В результате увеличивается время образования корки для металла, соприкасающегося с геометрией погружной части экзотермического стержня-вставки, что также влияет на фильтрацию воздуха через материал стержня в полость прибыли для образования правильной усадочной раковины.

С использованием верифицированной компьютерной модели исследовано влияние прибыльных вставок на формирование усадочных дефектов в стальной отливке. Натурные эксперименты проведены в цеховых условиях, аналогичные вычислительные эксперименты выполнены в программной среде LVMFlow. Материал отливки – сталь 20ГЛ, материал формы – песчано-глинистая смесь.

На рисунке 5.10 показана тестовая геометрия в опыте № 1, состоящая из двух кубических отливок с литниковой системой, одна из двух отливок имеет прибыль и изоляционную оболочковую вставку. В соответствии со схемой опыта № 1 во вставке установлены термопары на двух уровнях для регистрации температурных кривых.

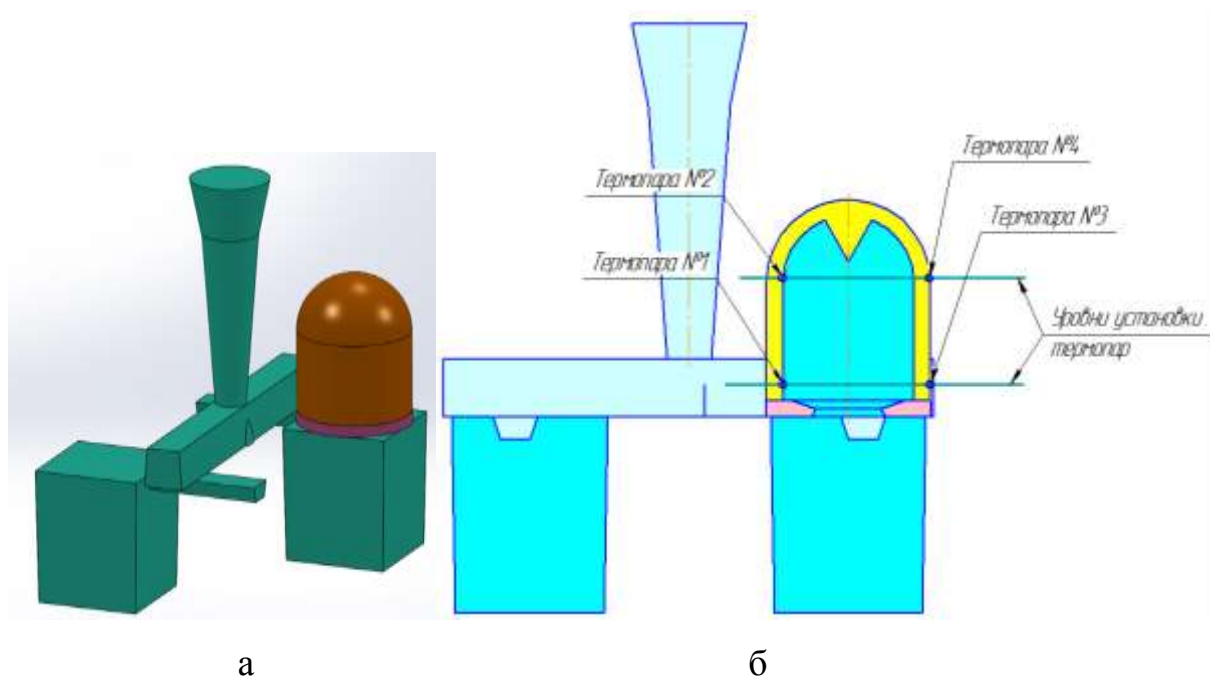


Рисунок 5.10 – Геометрия для тестовых испытаний (а) и схема установки термопар № 1 в экзотермической вставке прибыли (б)

На рисунке 5.11 представлена подготовка натурального эксперимента для восстановления теплофизических свойств материала вставки. Экспериментальные и расчетные температурные кривые охлаждения показаны на рисунке 5.12; график 9 на рисунке показывает расчетное изменение температуры на наружной поверхности формы.

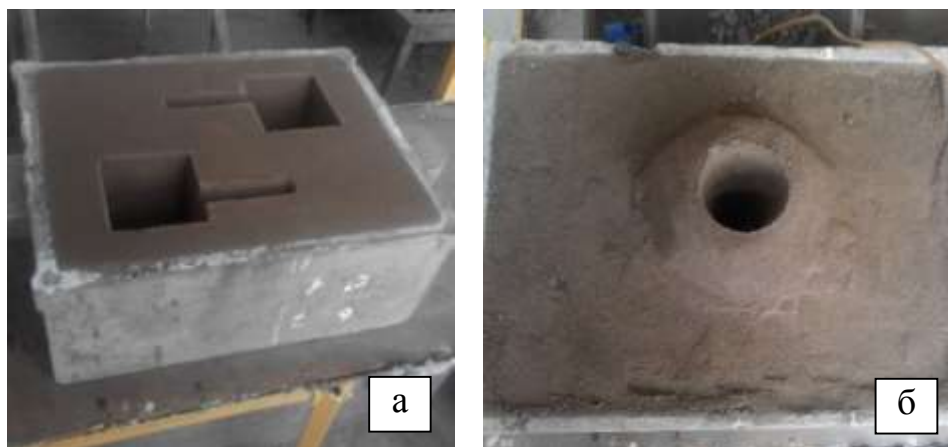


Рисунок 5.11 – Нижняя полуформа (а) и верхняя полуформа с установленными термопарами (б)

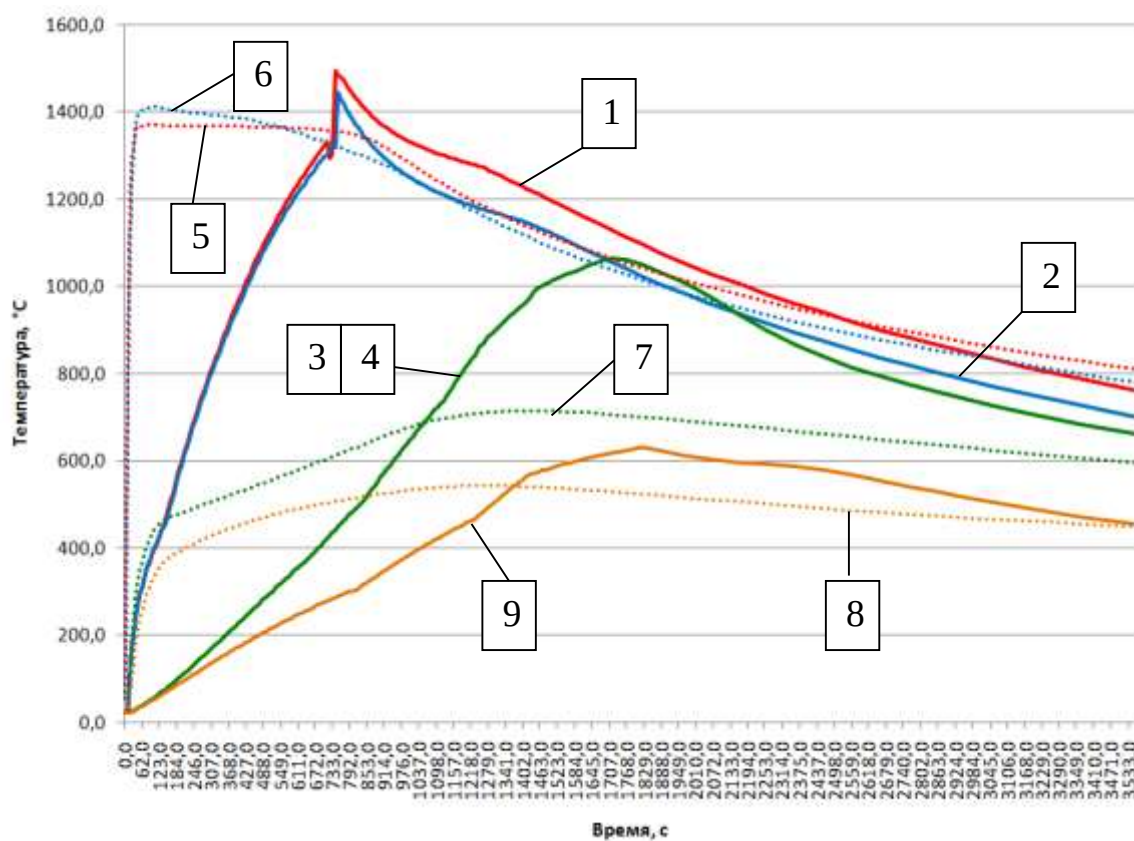


Рисунок 5.12 – Расчетные (1-4, 9) и экспериментальные (5-8) температурные кривые охлаждения для схемы установки термопар №1

На рисунке 5.13 показано реальное расположение усадочной раковины в разрезанных отливках, а также прогнозируемые раковины в сечениях компьютерной модели. Расчетные данные совпадают с экспериментальными.

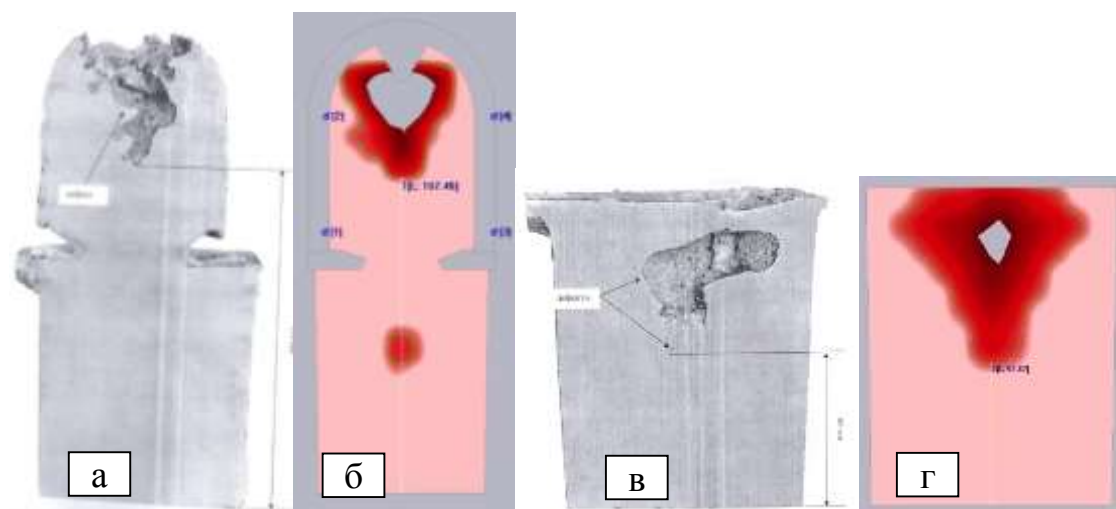


Рисунок 5.13 – Расположение усадочной раковины в отливках с прибылью (а, б) и без прибыли (в, г) в опыте № 1 в натурном (а, в) и вычислительном (б, г) экспериментах

В опыте № 2 тестовая геометрия (рисунок 5.14) состоит из двух кубических отливок с прибылями и литниковой системой, одна из прибылей имеет изоляционную оболочковую вставку.

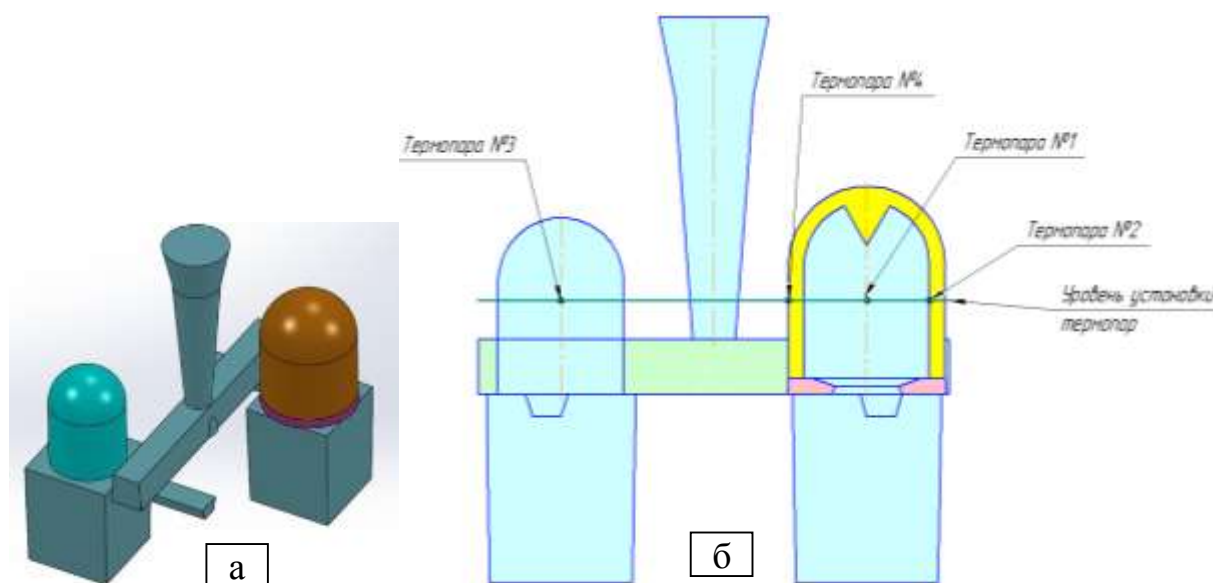


Рисунок 5.14 – Геометрия для тестовых испытаний (а) и схема установки термопар (б) в опыте № 2

В соответствии со схемой опыта № 2 термопары установлены в двух отливках на одном уровне. На рисунке 5.15 показана форма, залитая металлом, и соответствующие натурному эксперименту фрагменты вычислительного эксперимента.

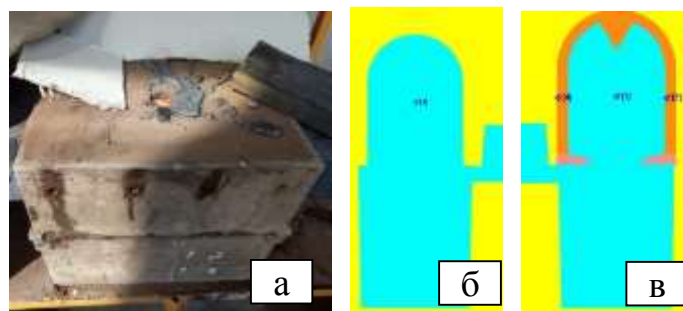


Рисунок 5.15 – Форма с затвердевающей отливкой (а), и компьютерная модель в опыте № 2: сечение отливок с прибылью (б) и без прибыли (в)

Разрезы реальных и виртуальных отливок в опыте № 2 представлены на рисунке 5.16. Из сравнения результатов, полученных в опытах № 1 и № 2 для различных условий затвердевания отливки с простой кубической геометрией в песчаной форме, следует, что применение экзотермической вставки позволяет концентрировать усадочные дефекты в прибыли.

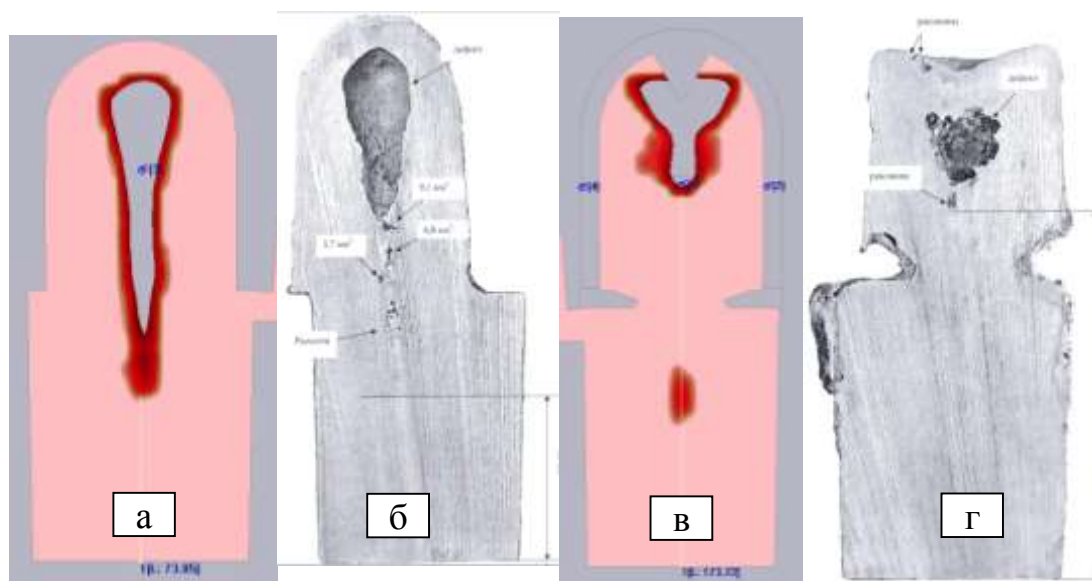


Рисунок 5.16 – Расположение усадочной раковины в отливках с прибылью без вставки (а, б) и с экзотермической вставкой (в, г) в опыте № 2 в натурном (а, в) и вычислительном (б, г) экспериментах

Совпадение расчетных и экспериментальных результатов по локализации и объему усадки подтверждает корректность компьютерной модели, что позволяет в дальнейшем оптимизировать объем прибылей при проектировании литейной оснастки и совершенствовании технологии изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок в САПР.

На рисунке 5.17 показаны тепловые поля при кристаллизации прибылей с разной конструкцией экзотермических стержней-вставок. В компьютерной модели задан размер ячейки расчетной сетки 6 мм. К начальным условиям компьютерной модели относится начальная температура расплава (1580°C), а также формы и экзотермического стержня (20°C). Компьютерная модель содержит уточненные данные по свойствам материалов формы, и стержня-вставки, которые обеспечивают более точное вычисление температурных полей на расчетной сетке.

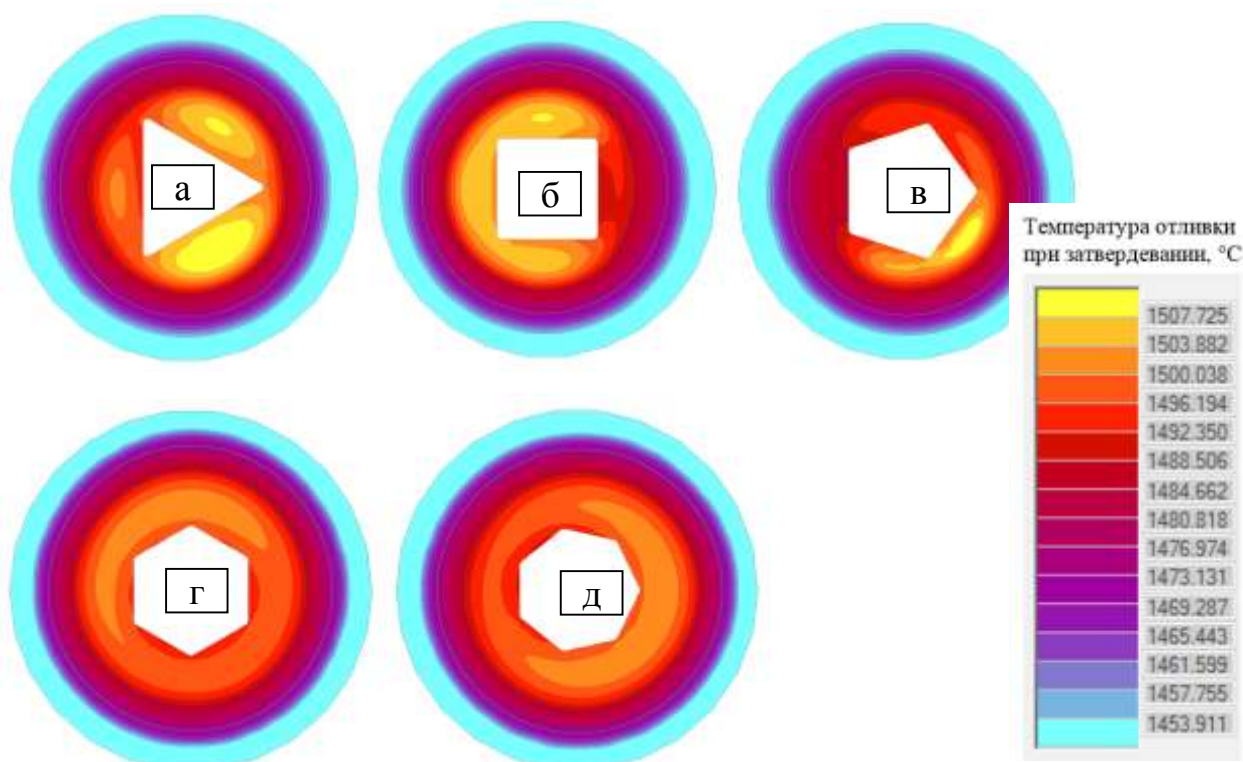


Рисунок 5.17 – Температурные поля в сечениях прибылей с различными видами стержней-вставок в одинаковый момент времени 100 с (а-д)

Из результатов моделирования следует, что чем меньше число граней в рабочей части экзотермического стержня-вставки, тем выше температура металла в контакте с прибылью. Таким образом, в вычислительном эксперименте подтверждается предположение о более интенсивном прогреве металла и более долговременной работе прибылей с конструкцией стержня-вставок, имеющих погружную часть в виде усеченной n -гранной пирамиды, по результатам расчета следует рекомендовать число граней n от трех до пяти.

По результатам вычислительного эксперимента были изготовлены промышленным способом экзотермические стержни-вставки, содержащие в конструкции 3, 4 и 5 граней (рисунок 5.18).

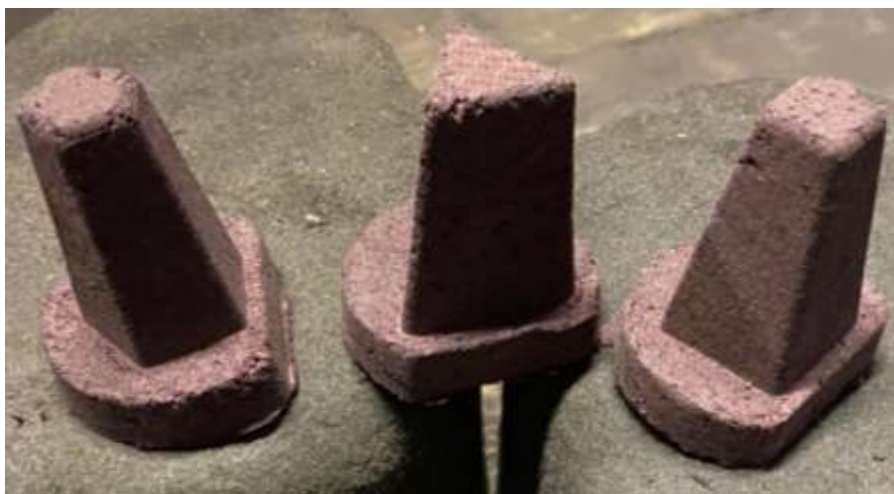


Рисунок 5.18 – Экзотермические стержни-вставки, изготовленные промышленным способом

Эффективность разработанных стержней-вставок проверена экспериментально в сравнении с осесимметричными вставками. Температурные кривые (рисунок 5.19) для трехгранного стержня измерены термопарами, установленными в прибылях непосредственно под вставками.

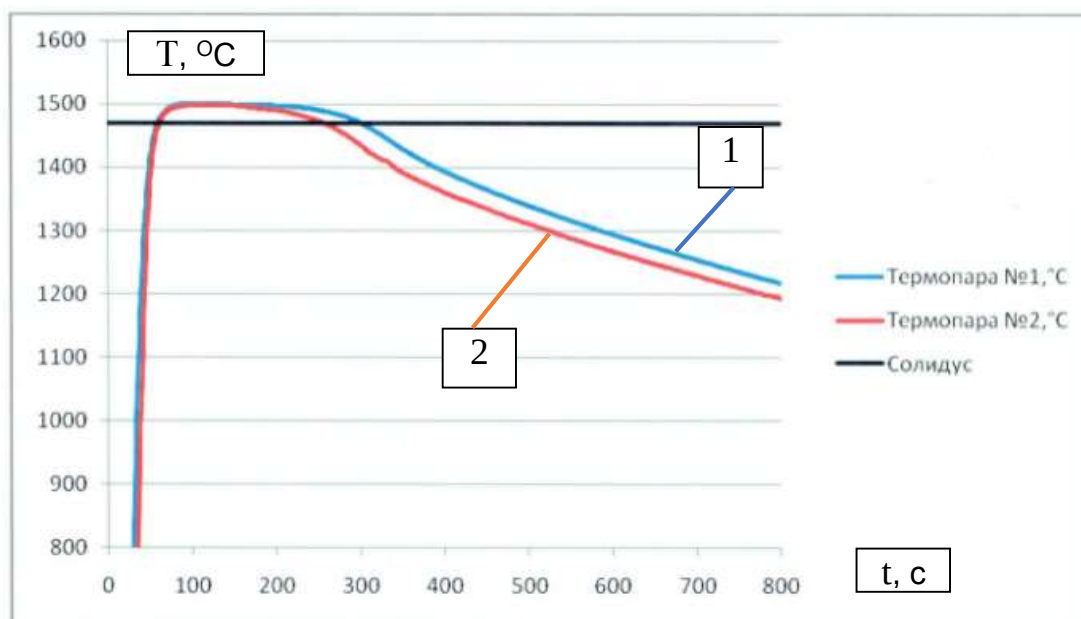


Рисунок 5.19 – Температурные кривые охлаждения прибылей с трехгранной вставкой (1) и стандартной осесимметричной вставкой СТЭ 63-29

Сравнение температурных кривых для трехгранной вставки и осесимметричной вставки подтверждает, что прибыль с трехгранным экзотермическим стержнем-вставкой, увеличивает продолжительность работы прибыли на 50 секунд, что положительно сказывается на питании отливки. В качестве подтверждения на рисунке 5.20 приводится изображение отливки и прибыли в разрезе после затвердевания.

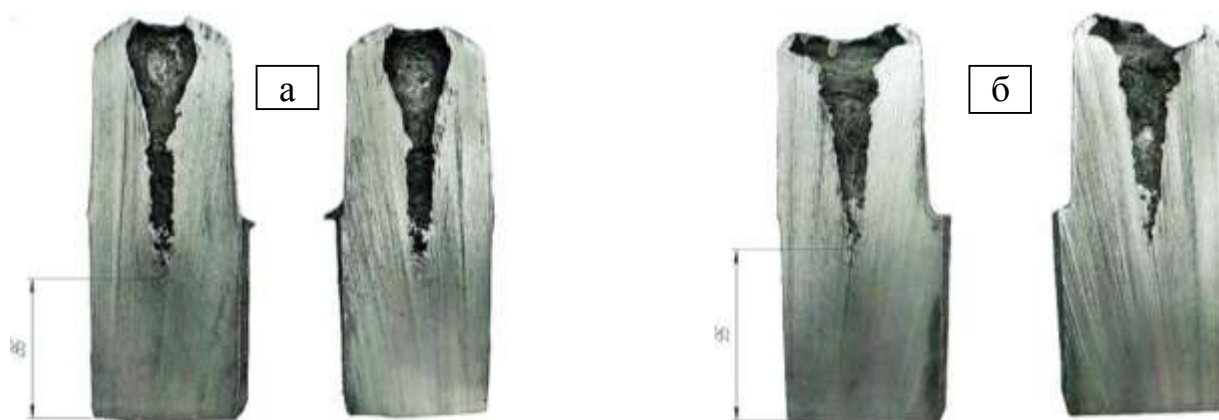


Рисунок 5.20 – Отливка со стандартным стержнем-вставкой СТЭ 63-29 (а) и трехгранным стержнем-вставкой (б)

По результатам проведенных исследований получены 3 патента на промышленные образцы [111-113], в которых сформулировано новое техническое решение, касающееся экзотермических стержней-вставок с количеством граней от 3 до 5. Ряд других полученных технических решений, связанных с песчаными смесями и технологической оснасткой, отражены также в опубликованных патентах РФ [114-117].

5.3 Совершенствование технологии изготовления отливки «Рама боковая»

5.3.1 Дефекты в отливке «Рама боковая» при изготовлении по исходной технологии

Техническое перевооружение производства УВЗ в последнее десятилетие позволило существенно увеличить производительность формовочных процессов и снизить трудоемкость, но при этом повысился уровень брака отливок по дефектам усадочного происхождения. Как правило, усадочные дефекты возникали в углах сопряжения стенок.

На рисунке 5.21 показаны зоны усадочных дефектов, спрогнозированных программой LVMFlow. Для удобства работы по устранению спрогнозированных программой дефектов, каждая проблемная зона обозначена порядковым номером.

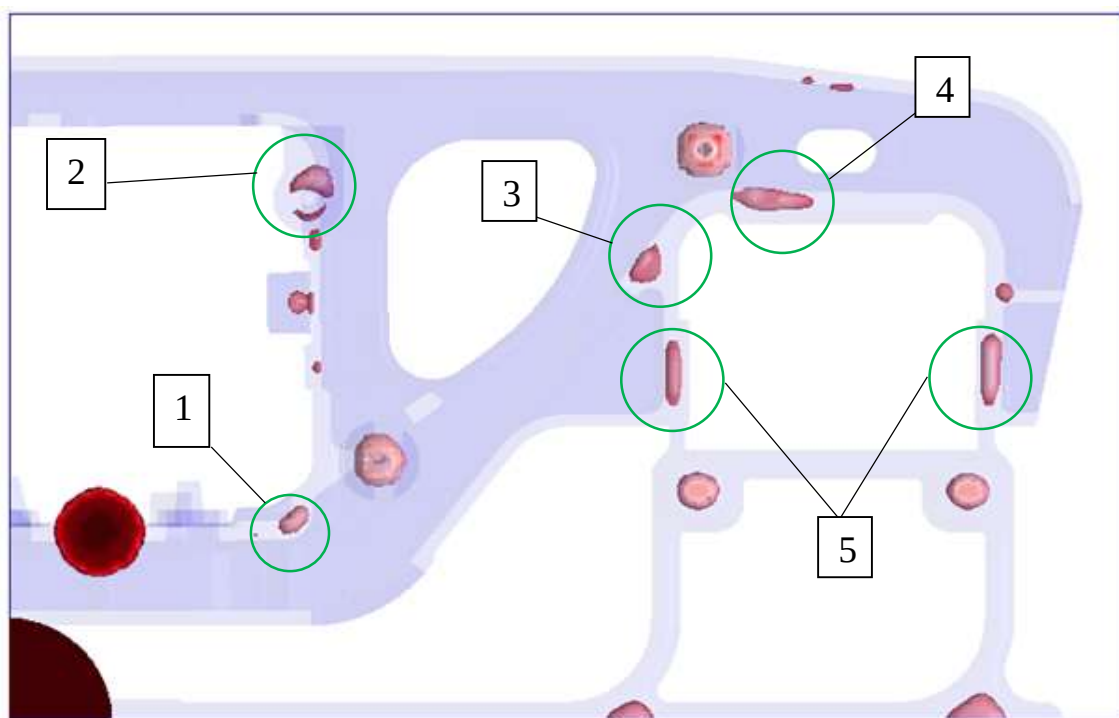


Рисунок 5.21 – Зоны образования усадочных дефектов

Зона 1 – радиус проема для рессорного подвешивания. Дефект (рисунок 5.22) в зоне 1 требует устранения, поскольку превышает размеры, допускаемые требованиями ГОСТ 32400-2013.

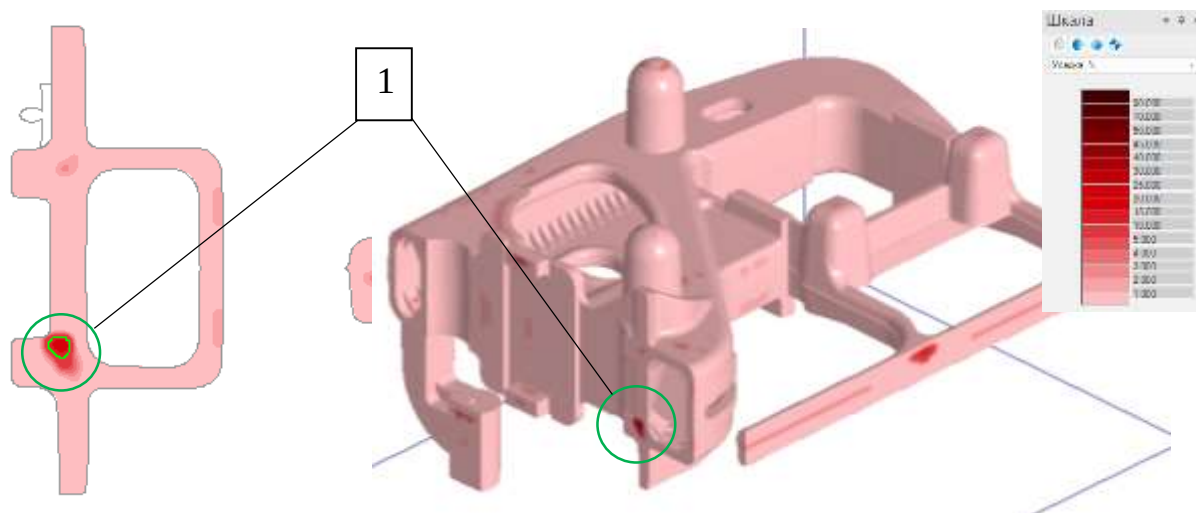


Рисунок 5.22 – Усадочный дефект в зоне 1

Зона 2 – кронштейн триангеля. Дефект (рисунок 5.23) в зоне 2 периодически обнаруживается при механической обработке отливки «Рама боковая» и допускается к устранению.

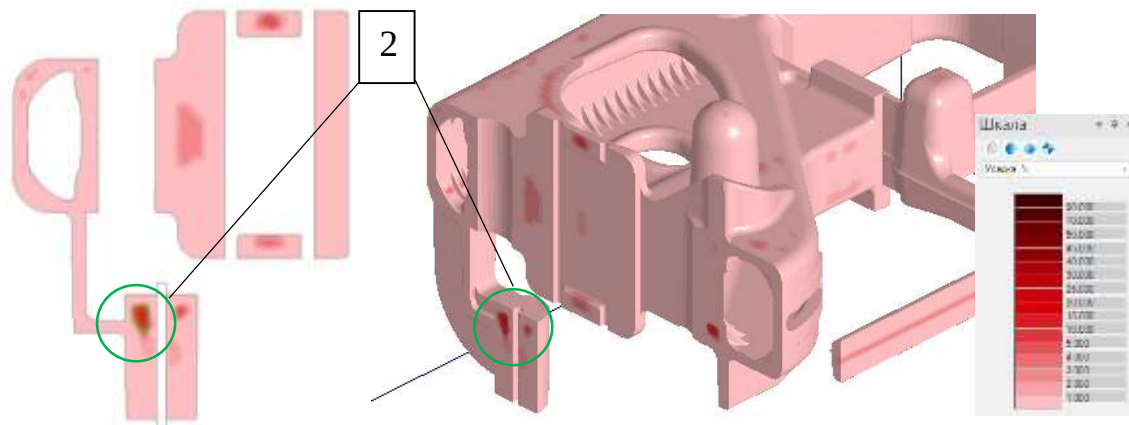


Рисунок 5.23 – Усадочный дефект в зоне 2

Зона 3 – внутренний радиус буксового проема. Дефект (рисунок 5.24) в зоне 3 требует устранения, поскольку находится в ответственном сечении литой детали и является опасным дефектом.

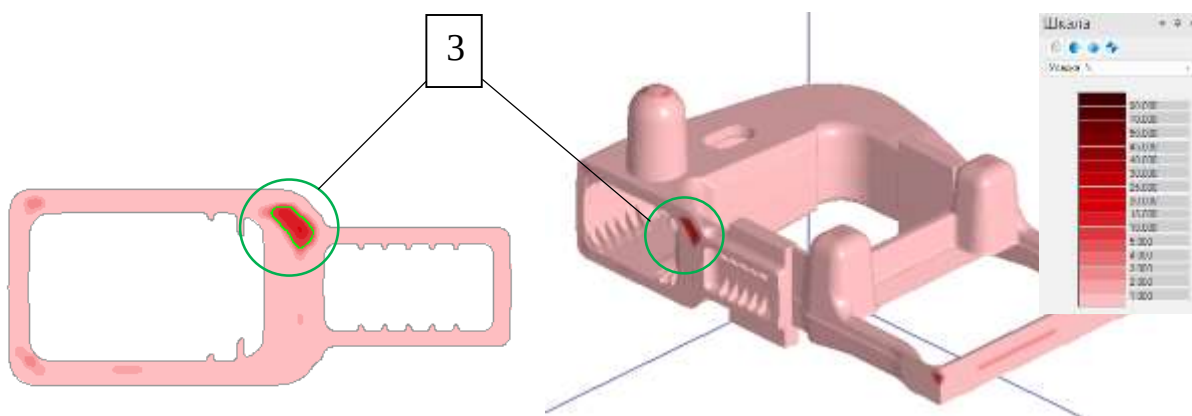


Рисунок 5.24 – Усадочный дефект в зоне 3

Зона 4 – опорная площадка буксового проема. Дефект (рисунок 5.25) в зоне 4 требует устранения, поскольку располагается в ответственном сечении литой детали.

Зона 5 – ограничительные пластины. Дефект (рисунок 5.26) в зоне 5 периодически обнаруживается при механической обработке отливки «Рама боковая». Дефект обнаруживается как во внутренней, так и в наружной «челюсти», обширные размеры дефекта обуславливают необходимость его устранения технологическими методами на стадии формирования отливки.

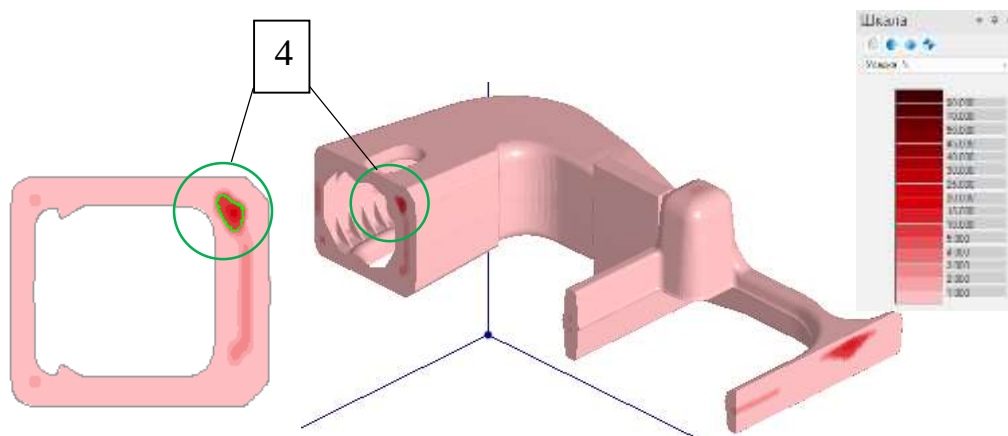


Рисунок 5.25 – Усадочный дефект в зоне 4

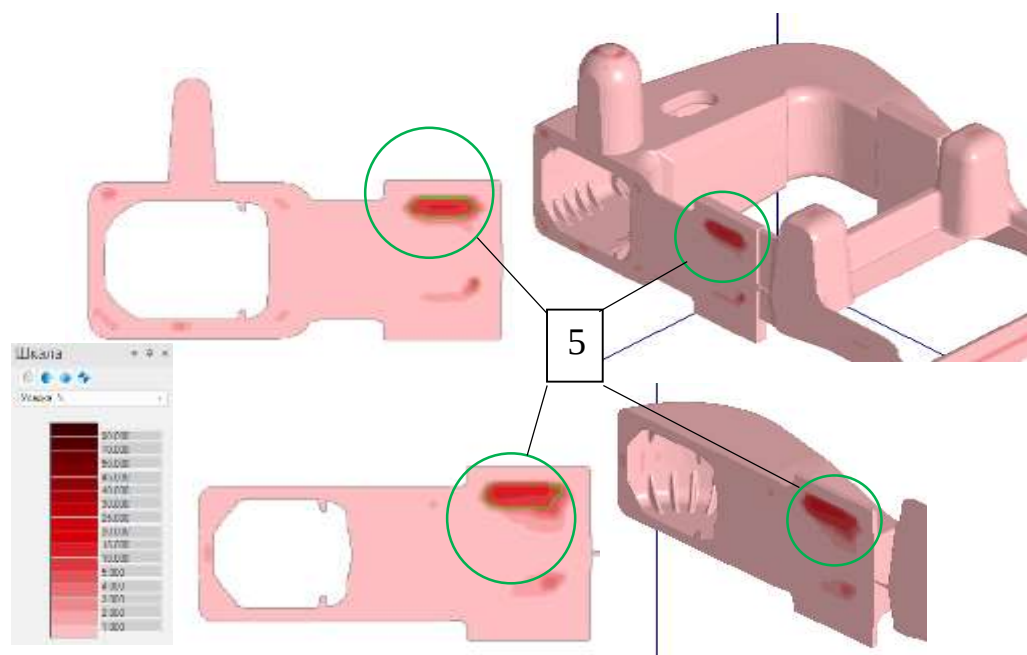


Рисунок 5.26 – Усадочный дефект в зоне 5

Результаты прогнозирования усадочных дефектов в программе LVMFlow подтверждаются разрушающим контролем (рисунок 5.27). Такие факторы, как значительные габаритные размеры отливки, ее сложная конфигурация при толщине 15-20мм, а также стержни на основе ХТС, создают благоприятные условия для образования не только усадочных дефектов, но и горячих трещин (рисунок 5.28). К появлению горячих трещин приводит также неравномерное распределение скорости охлаждения. Даже незначительные местные перегревы при заливке тонкостенных отливок приводят к появлению горячих трещин и короблению. Анализ условий образования трещин выполняется в условиях УВЗ с применением разработанной нами пробы для

контроля трещиностойкости и жидкотекучести металла. Разработанная проба защищена патентом РФ [118].

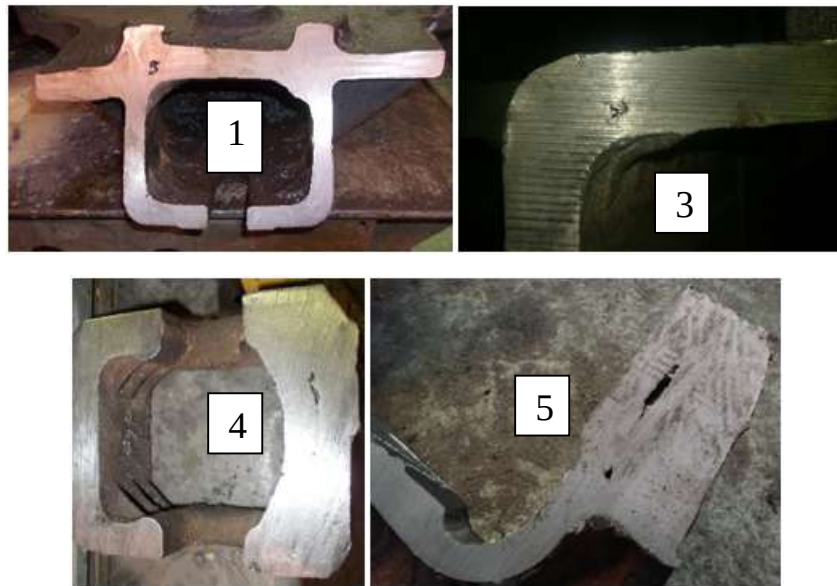


Рисунок 5.27 – Усадочные дефекты, обнаруженные в сечениях отливки «Рама боковая» при порезке в зонах 1, 3, 4, 5



Рисунок 5.28 – Усадочные дефекты на внутренней поверхности (а) и в теле отливки «Рама боковая» (б, в); горячие трещины (г)

Стержни на основе ХТС производятся в условиях УВЗ на оборудовании итальянской фирмы IMF по Cold Box-Amin процессу, теплофизические свойства которых уточнены в рамках данной диссертационной работы. Уточненные свойства формовочных смесей и верифицированная компьютерная модель на базе российского программного обеспечения LVMFlow были использованы для моделирования и совершенствования технологии изготовления крупногабаритных вагонных отливок [119]. Следует отметить, что итальянские специалисты использовали для компьютерного моделирования зарубежное программное обеспечение SolidCast, и результаты компьютерного предсказания возможных литейных дефектов оказались неверными, что обсуждалось в главе 2.

Дополнительные исследования были проведены в связи с необходимостью разработать новые подходы к изготовлению крупногабаритных стальных отливок повышенного качества с применением стержней на основе ХТС.

При разработке технологии были учтены следующие факторы:

- повышенная прочность стержней на основе ХТС, что способствует затрудненной усадке и склонности к образованию трещин в отливках;
- снижение скорости отвода тепла от металла в начальный период после заливки, что может привести к смещению тепловых зон по сравнению с процессами затвердевания аналогичной отливки в контакте с ПГС;
- повышенная стойкость стержней на основе ХТС к облучению, что уменьшает возможность осыпания и расширяет возможности выбора конструкции литниковой системы.

5.3.2 Выбор литниковой системы

Важным фактором повышения качества крупногабаритных тонкостенных отливок и объектом совершенствования является конструкция литниково-питающей системы, обоснование которой в данной работе дано с учетом сформировавшихся представлений и результатов компьютерного моделирования. Литниковая система рассчитана так, чтобы минимизировать

разрушающее воздействие потока при заполнении расплавом литейной формы. Появление турбулентных зон может привести к разрушению стенок литниковых каналов, стержней и формы, а также – к эффектам обратного течения, и как следствие, – к недоливу.

Быстрое и в то же время спокойное заполнение песчаных форм в случае сложных по геометрии, крупных тонкостенных отливок было обеспечено за счет внедрения расширяющихся литниковых систем со следующим соотношением площади сечений стояка, литниковых ходов и питателей:

$$F_{\text{стояк}} : F_{\text{литниковый ход}} : F_{\text{питатель}} = 1 : (1,2 \dots 1,5) : (1,4 \dots 2) \quad (5.1)$$

Разработанные литниковые системы для питания тонкостенных отливок обеспечивают минимальное охлаждение металла в процессе заполнения формы и тем самым предупреждают брак отливок по недоливам и спаям. Этому способствует также внедрение литниковых систем с ходами круглых и эллиптических сечений, имеющими по сравнению с ходами прямоугольных сечений меньшую площадь поверхности охлаждения (рисунок 5.29).

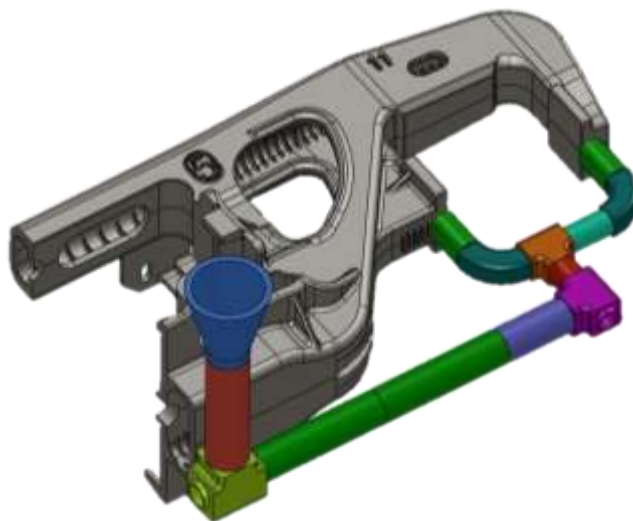


Рисунок 5.29 – Литниковая система из стандартизированных шамотных изделий

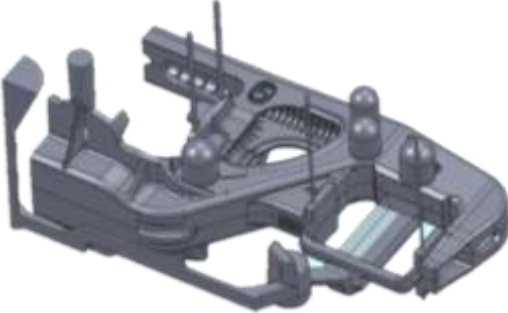
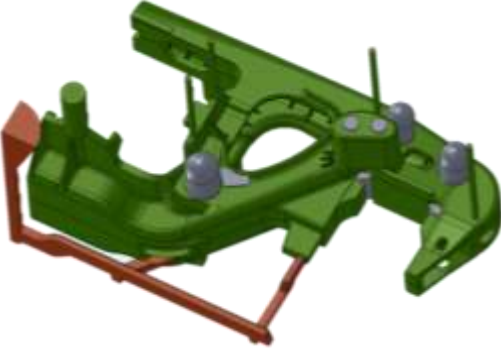
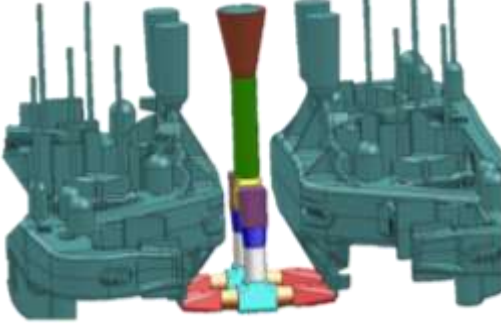
Во всех конструкциях литниковых систем предусмотрены вертикальные и горизонтальные тупиковые части (зумфы) литниковых каналов. Заполняясь металлом в первую очередь, тупиковые части воспринимают удар металла, поступающего в форму, и тем самым уменьшают разрушение формы.

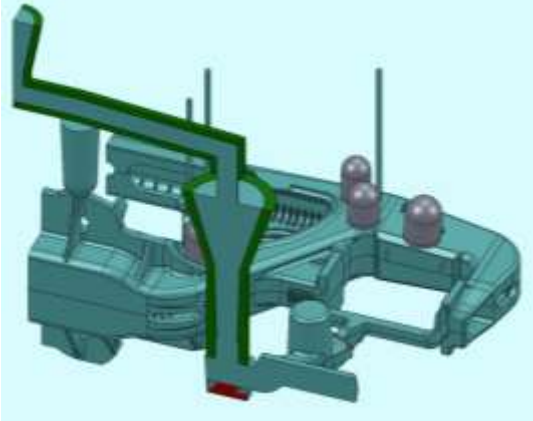
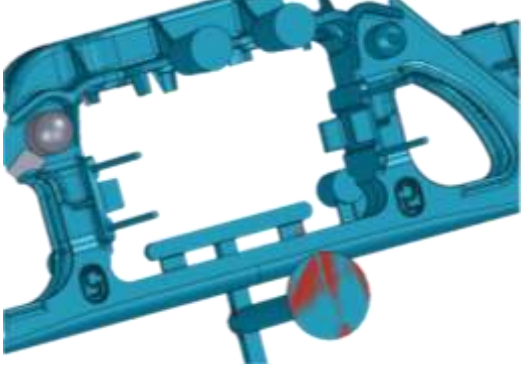
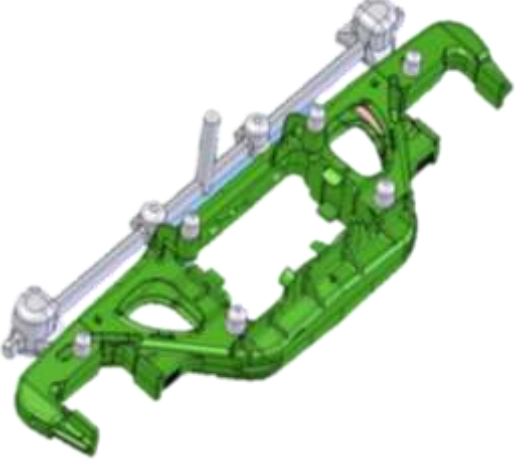
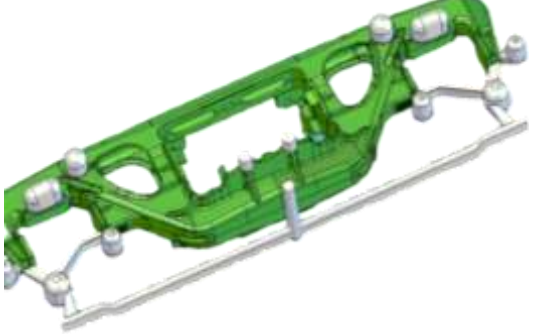
Особое внимание при конструировании литниковых систем было обращено на выбор места подвода металла в полость отливки. Металл можно подводить либо вдоль отливки с заливкой двух отливок одновременно, либо в центр отливки с заливкой последовательно по одной отливке. Моделированию в САПР литейной технологии LVMFlow подвергнуты варианты подвода металла, представленные в таблице 5.2. Представленные варианты не являются типовыми и стандартными.

Таблица 5.2 – Варианты литниковой системы для отливки «Рама боковая»

№ п/п	Описание литниковой системы	Геометрическая модель литниковой системы
1	2	3
1	Литниковая система с подводом металла в челюсти (4 питателя на отливку, 2 отливки в форме) с отводными прибылями-шлакоуловителями, соединёнными технологической стяжкой (исходный вариант)	
2	Литниковая система с подводом металла в центральную часть отливки во фрикционные планки (2 питателя на отливку, 2 отливки в форме с поочередной заливкой)	
3	Литниковая система с подводом металла в верхний пояс отливки через отводные прибыли (2 питателя на отливку, 2 отливки с измененным расположением в форме)	

Продолжение таблицы 5.2

1	2	3
4	Литниковая система с сифонным подводом металла в пружинную полку (2 питателя на отливку, 2 отливки в форме)	
5	Литниковая система с центробежным шлакоуловителем и подводом металла в нижнюю часть опорной площадки буксового проема (2 питателя на отливку, 2 отливки в форме)	
6	Литниковая система с подводом металла в кронштейн ограничителя и нижний пояс в зону усиления сливного отверстия (2 питателя на отливку, 2 отливки в форме)	
7	Литниковая система с сифонным подводом металла в пружинную полку с использованием специализированных шамотных изделий (2 питателя на отливку, 2 отливки в форме)	

1	2	3
8	Литниковая система для заливки куста отливок одновременно через два стояка с использованием специального заливочного устройства (4 питателя на отливку, 2 отливки в форме)	
9	Литниковая система с подводом металла в верхний пояс со стороны рессорного проема (2 питателя на отливку, 2 отливки с измененным расположением в форме)	
10	Литниковая система с подводом металла в верхний пояс отливки через отводные прибыли (4 питателя на отливку, 2 отливки с измененным расположением в форме)	
11	Литниковая система с подводом металла в челюсти рамы, с центробежным шлакоуловителем и отводными прибылями в зоне размещения питателей (4 питателя на отливку, 2 отливки в форме)	

Компьютерный анализ показал, что вариант № 2 дает возможность быстрого заполнения отливки, но увеличивает общую продолжительность разливки из 30-тонного ковша. Вариант № 3 подвода металла в верхний пояс с изменением положения отливок в форме позволяет устранить дефекты по верхнему поясу, однако в нижнем поясе усадочные дефекты остаются. Вариант № 4 сифонного подвода металла обеспечивает достаточную плотность всех контролируемых сечений отливки, однако практически на всех отливках присутствует пригар в зонах недоступных для его удаления.

Предполагалось, что в вариантах № 5 и № 6 будут устранены дефекты типа засоров в зоне радиусов буксового проема, однако результат опытных работ был отрицательный, кроме того, по варианту № 6 были обнаружены горячие трещины в зоне усиления сливного отверстия. Вариант № 7 является развитием варианта № 4 с гарантией исключения размыва формы и засоров, однако, как и в варианте № 4, не удалось обеспечить отсутствие пригара в канавках ограничителей пружин рессорной полки. Вариант № 8 обеспечивает снижение скорости потока, но в производственных условиях оказался неудобным из-за необходимости установки на каждую опоку устройства для распределения потоков металла на два стояка. Вариант № 9 не обеспечил отсутствие засоров и размыва литейной формы. Вариант № 10 является развитием варианта № 3, однако по результатам опытных работ были обнаружены горячие трещины в зоне подвода металла. Вариант № 11 не обеспечил снижение дефектности по засорам.

В итоге по результатам моделирования и проведения опытных работ были введены изменения в геометрию литниковой системы. Уточненный расчет проведен для 4 вариантов литниковых систем с анализом усадочных дефектов. Исходные данные для моделирования включают температуру заливки 1580 °С и диаметр выходного отверстия ковша 35 мм.

Вариант № 12: подвод металла в «челюсти» буксового проема (4 питателя на отливку, соединённые технологической стяжкой, 2 отливки в

форме), с использованием коробок для установки фильтров и отводных прибылей в зоне питания.

Вариант № 13: подвод металла в «челюсти» буксового проема (4 питателя на отливку, соединённые технологической стяжкой, 2 отливки в форме), с использованием перепадов в литниковом ходе и 4-х центробежных шлакоуловителей на форму.

Вариант № 14: подвод металла через стояк с расширяющимся шлакоуловителем и щелевым питателем в верхний пояс со стороны рессорного проема (1 питатель на отливку, 2 отливки в форме с поочередной заливкой).

Вариант № 15: усовершенствованная версия варианта № 12 с увеличенным размером коробок над фильтрами, с изменением площади сечения питателей в 0,5 раза – внутреннего, в 1,5 раза – наружного.

Расчетные параметры процесса заливки формы сведены в таблицу 5.3. Результаты компьютерного моделирования усадочных дефектов показаны на рисунке 5.30.

Таблица 5.3 – Расчетные параметры процесса заливки формы для различных вариантов литниковой системы

Вариант литниковой системы	Скорость течения металла, м/с		Время затвердевания, с			
	Левый питатель	Правый питатель	точка № 1	точка № 2	точка № 3	точка № 4
Вариант № 12	0,3	0,23	368	323	208	213
Вариант № 13	0,51	0,35	375	340	210	195
Вариант № 14	2,95		284	219	184	194
Вариант № 15	0,65	0,53	362	342	207	192

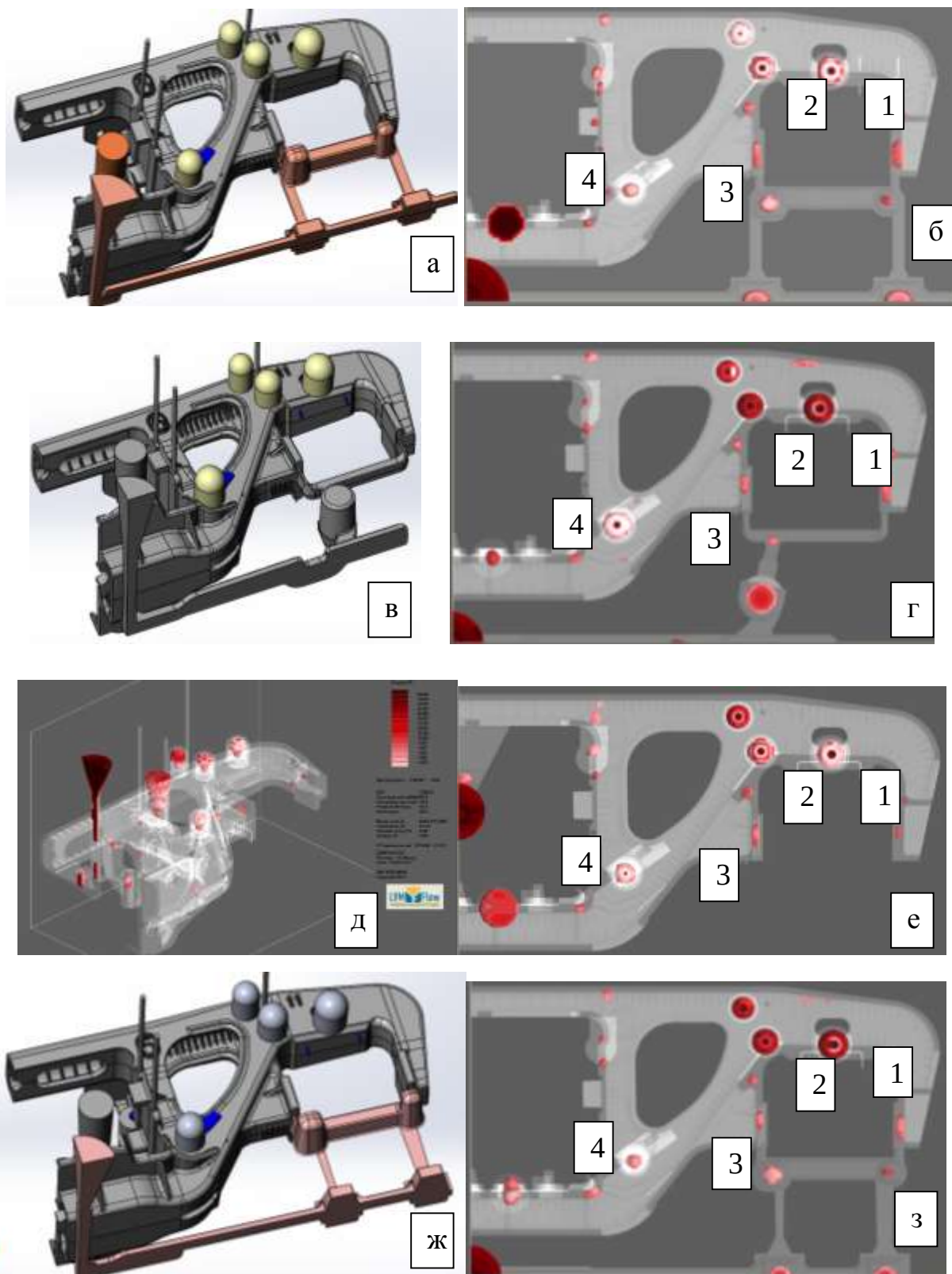


Рисунок 5.30 – Геометрические модели (а, в, д, ж) и соответствующие результаты моделирования усадочных дефектов (б, г, е, з) в отливке «Рама боковая» для вариантов литниковой системы № 12 (а,б), № 13 (в,г), № 14 (д,е), № 15 (ж,з)

На скриншотах, представляющих распределение усадочных дефектов, выделены точки установки сенсоров в компьютерной модели для определения времени окончания затвердевания в тепловом узле: 1 – сенсор в наружном радиусе; 2 – сенсор во внутреннем радиусе; 3 – сенсор в радиусе перехода поддомкратной площадки в нижний пояс; 4 – сенсор во внутреннем радиусе рессорного проема.

По итогам моделирования предпочтительным вариантом литниковой системы является вариант № 14, поскольку он обеспечивает быстрое заполнение формы расплавом, меньшее время затвердевания тепловых узлов и минимальное количество зон усадочной пористости.

5.3.3 Выбор прибылей

Для исключения усадочных дефектов в ограничительных пластинах (зона 5) выполнено компьютерное моделирование нескольких вариантов применения прибылей в сравнении с исходным вариантом (рисунок 5.31).

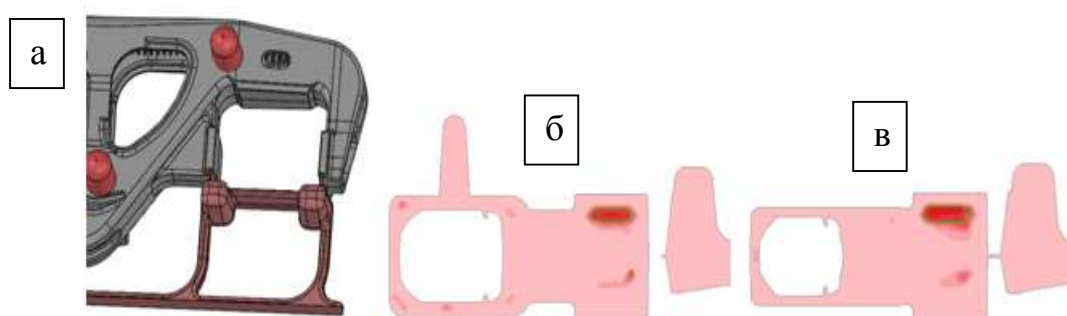


Рисунок 5.31 – Расположение отводных прибылей (а) в зоне подвода металла и локализация литейных дефектов в двух горизонтальных сечениях (б, в) в исходном варианте технологии

Для выбора прибылей проведен сравнительный компьютерный анализ двух вариантов с установкой отводных прибылей на наружной и внутренней челюстях отливки, которые отличаются размером и расположением прибылей. Вариант № 1: на питатели установлены отводные прибыли ($\varnothing=85$ мм, $H=175$ мм). Вариант № 2: на наружную челюсть установлены отводные прибыли ($\varnothing=110$ мм, $H=175$ мм). В обоих вариантах используются экзотермические трёхгранные стержни-вставки.

Сравнительные результаты моделирования усадочных дефектов представлены на рисунке 5.32. По результатам компьютерного моделирования предпочтительным является вариант размещения отводных прибылей № 2, поскольку он обеспечивает отсутствие усадочных дефектов в сечениях прилегающих стенок отливки.

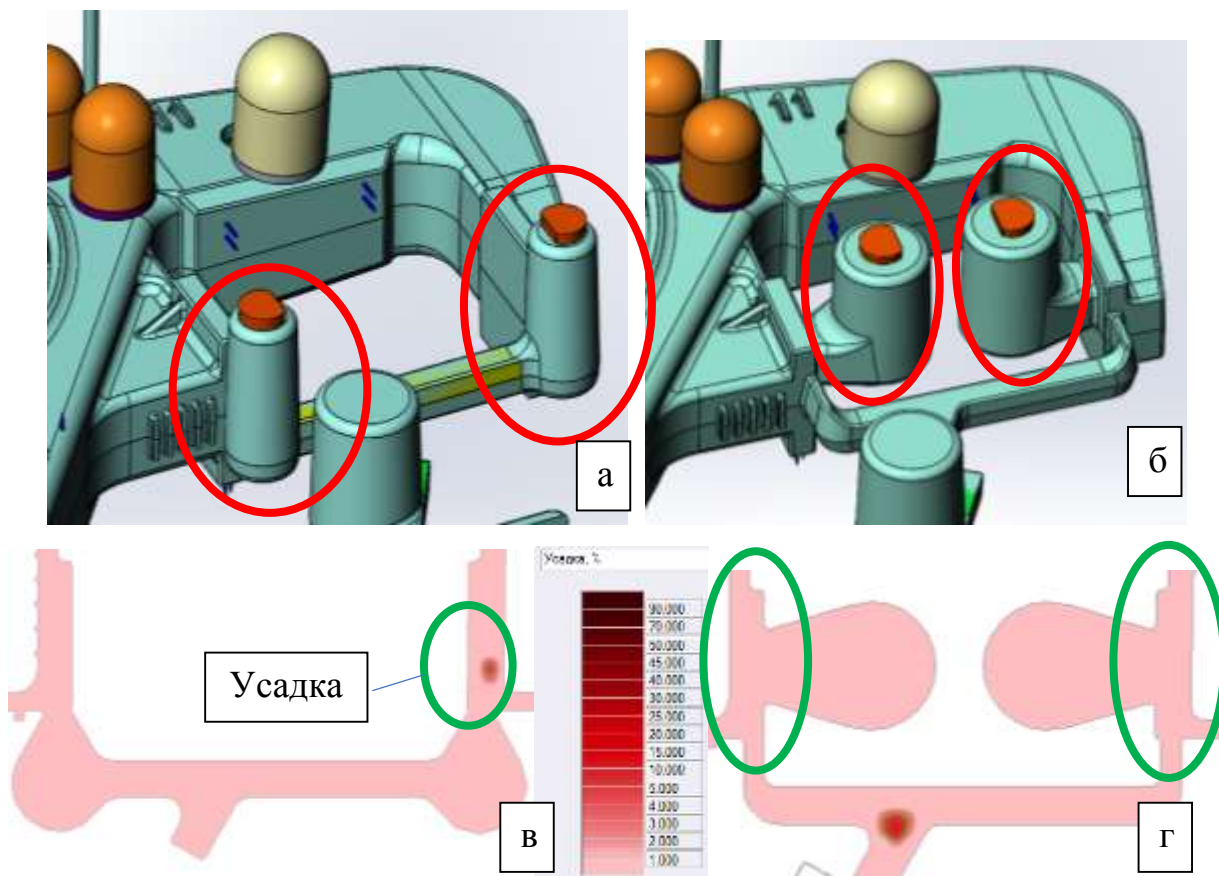


Рисунок 5.32 – Геометрические модели (а, б) и расчетный параметр усадочной пористости (в, г) для вариантов № 1 (а, в) и № 2 (б, г) размещения отводных прибылей

Для выбора конфигурации отводной прибыли рассмотрены два варианта: вариант № 1 с применением отводной прибыли $d=90$ мм, $h=185$ мм и горизонтального питателя 60×25 мм; вариант № 2 с применением отводной прибыли $d=110$ мм, $h=175$ мм, питателя 60×60 мм и экзотермического трехгранного стержня в верхней части прибыли (рисунок 5.33).

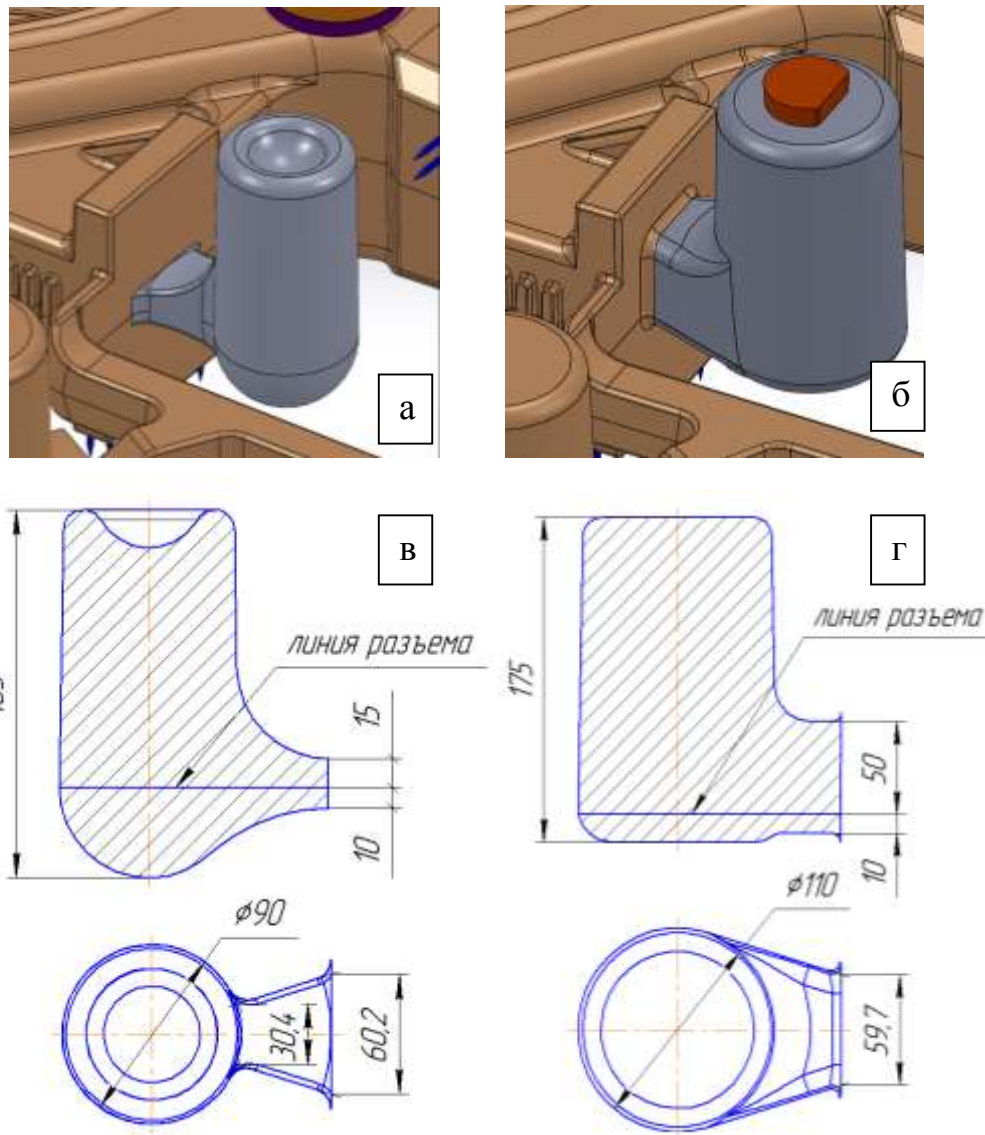


Рисунок 5.33 – Геометрия (а, б) и чертеж (в, г) вариантов № 1 (а, в) и № 2 (б, г) конфигурации отводной прибыли

По результатам компьютерного моделирования усадочных дефектов, представленных на рисунке 5.34, предпочтительным является вариант конфигурации отводной прибыли № 2, поскольку он обеспечивает отсутствие усадочных дефектов в сечениях прилегающих стенок отливки.

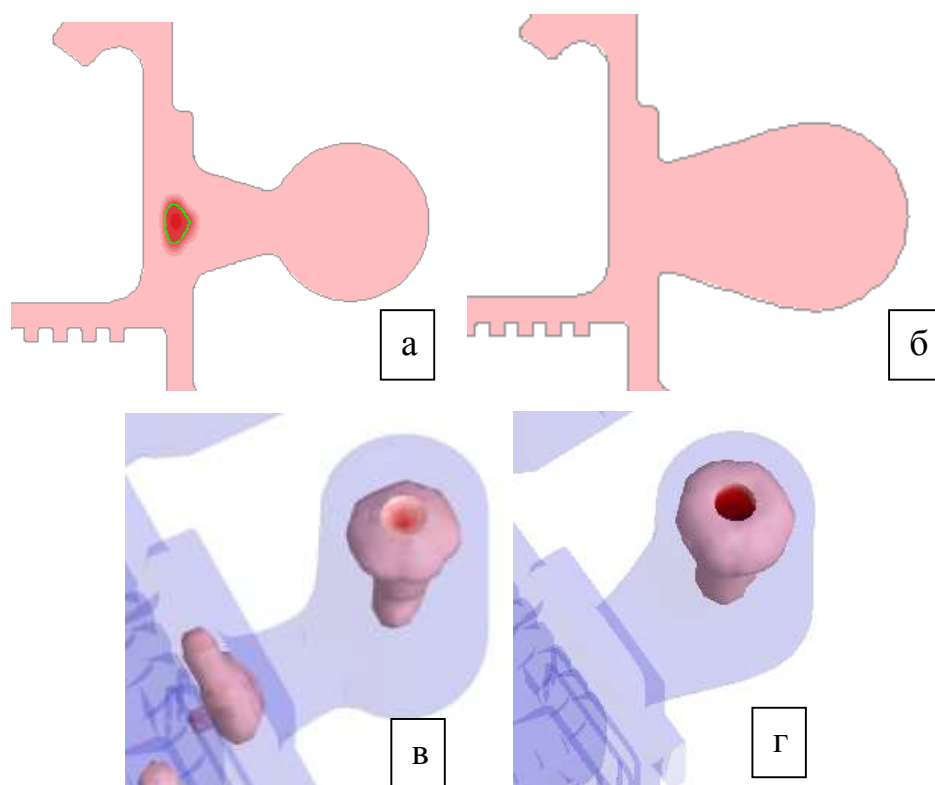


Рисунок 5.34 – Усадочные дефекты в сечении (а, б) и в объеме (в, г) отводной прибыли для вариантов конфигурации № 1 (а, в) и № 2 (б, г)

Для исключения усадочных дефектов в зонах радиуса R55 (зона 3) и опорной площадки (зона 4) буксового проема выполнено сравнение двух вариантов прибыли. В варианте № 1 применяется прибыль прямого действия диаметром $d=95$ мм и высотой $h=137$ мм. В варианте № 2 применяются экзотермические оболочки с подрезными кольцами (для уменьшения трудоемкости удаления прибылей) производства компании ООО «Волокнистые огнеупоры» CX-70, CX-3 и CX-2.

Результаты компьютерного моделирования усадочных дефектов с применением уточненных теплофизических свойств материалов приведены на рисунке 5.35. По результатам компьютерного моделирования усадочных дефектов предпочтительным является вариант № 2 применения прибылей, поскольку он исключает усадочные дефекты в опасных сечениях прилегающих стенок отливки. Изменение типа прибылей на экзотермические и такое расположение прибылей, когда каждая из них обеспечивает питание

своей проблемной зоны, положительным образом сказывается на картине распределения усадочной пористости.

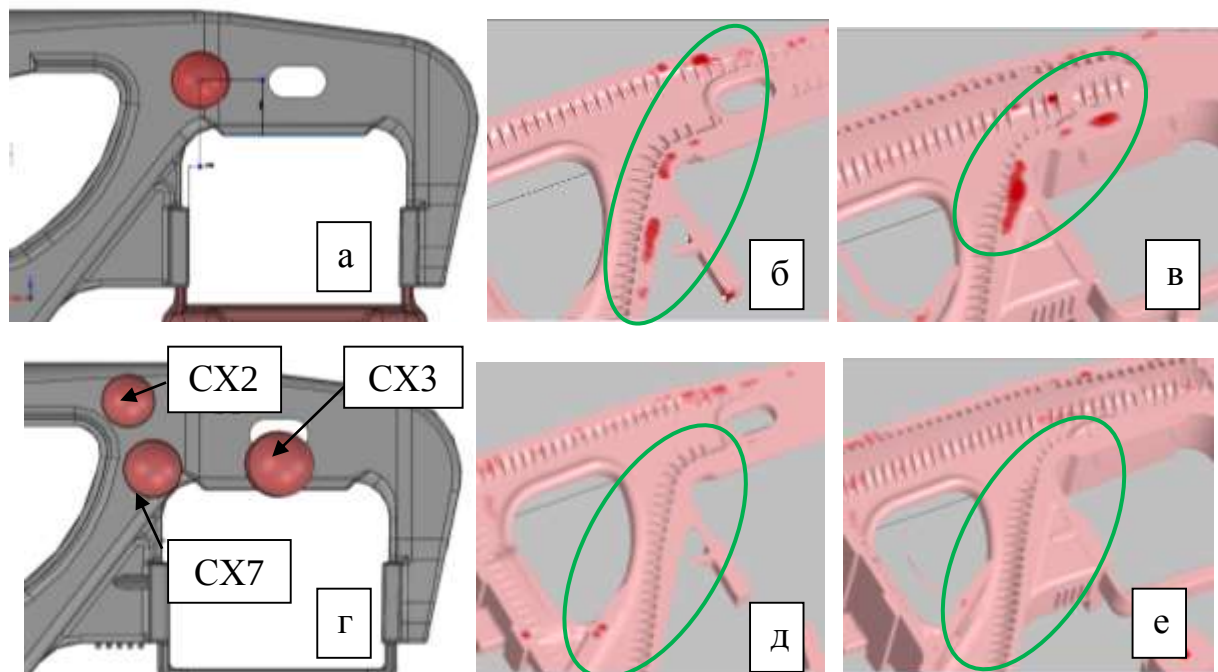


Рисунок 5.35 – Расположение прибылей (а, г) и усадочных дефектов в двух горизонтальных сечениях (б, в, д, е) отливки «Рама боковая» для вариантов № 1 (а, б, в) и № 2 (г, д, е)

Для исключения усадочных дефектов в зоне радиуса проема рессорного подвешивания (зона 1) проверен вариант (рисунок 5.36) применения технологического пополнения с внутренней стороны отливки и частично удаляемой прибыли диаметром $d=100$ мм и высотой $h=210$ мм. Компьютерное моделирование и разрушающий контроль подтверждают эффективность применения технологического пополнения с внутренней стороны отливки и частично удаляемой прибыли для устранения усадочных дефектов в зоне радиуса проема рессорного подвешивания. Устранение усадочных дефектов достигается в большей степени из-за эффективного питания теплового узла от такой прибыли по сравнению с вариантом установки холодильников в радиусе проема рессорного подвешивания.

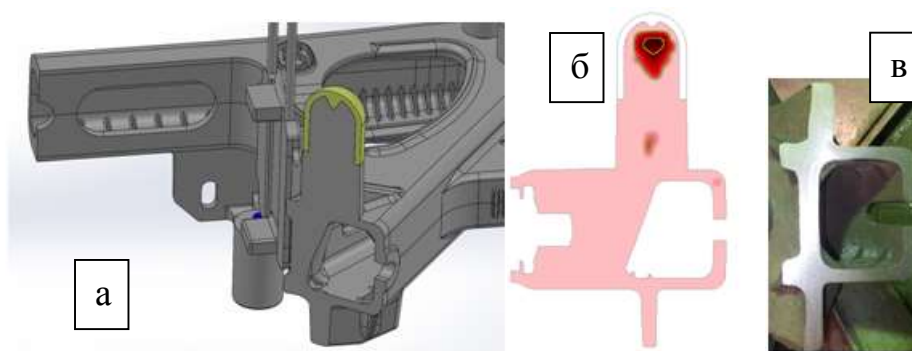


Рисунок 5.36 – Геометрическая модель отливки «Рама боковая» с частично удаляемой прибылью (а) и результат проверки усадочных дефектов в сечении отливки путем компьютерного моделирования (б) и разрушения отливки (в)

После проведения опытных работ в цеховых условиях УВЗ стали применять легкоотделяемые прибыли. Применение легкоотделяемых прибылей позволило решить проблемы, связанные с усадочными дефектами, а также полностью ликвидировать трудоемкий процесс огневой отрезки прибылей. В настоящее время 80% вагонных отливок на заводе изготавливаются с легкоотделяемыми прибылями.

5.3.4 Выбор холодильников

Установка прибылей приводит к дополнительному расходу жидкого металла, что снижает выход годного и повышает себестоимость изготовления литых деталей. Кроме того, установка прибылей увеличивает трудоемкость обрубных работ. Поскольку снижение веса прибылей является существенным резервом снижения себестоимости отливок, то возможная замена нескольких прибылей внутренними и наружными холодильниками является конкурентным конструктивным решением.

Наружные холодильники для крупногабаритных стальных отливок в условиях УВЗ изготавливают литыми и из фасонного проката. Внутренние холодильники изготавливаются из проволоки диаметром 3-4 мм в виде прутков и скобок длиной до 300 мм. В литейной практике часто в узлах отливок, где в дальнейшем должны просверливаться отверстия, удается исключить прибыли за счет установки внутренних холодильников. Диаметр

холодильника выбирается с таким расчетом, чтобы после его высверливания при механической обработке отливки оставался дополнительный припуск на обработку размером 6-8 мм.

В исходной технологии применяется один холодильник в радиусе проема рессорного подвешивания (зона 1), который не исключает появление недопустимых усадочных дефектов в тепловом узле (рисунок 5.37).

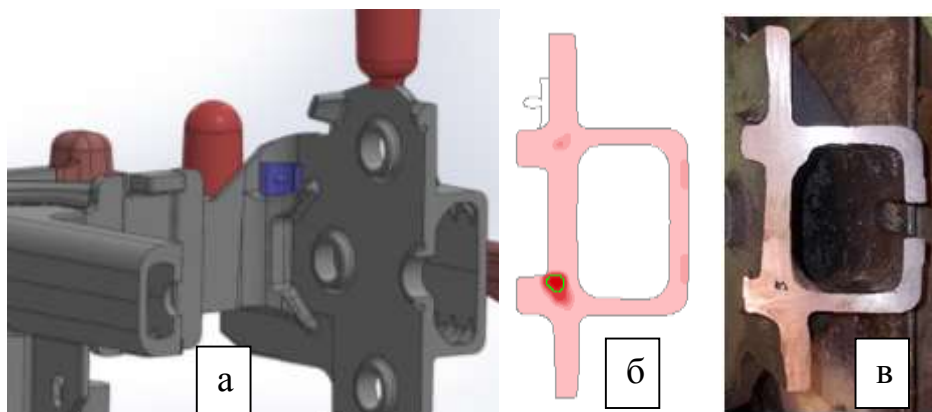


Рисунок 5.37 – Расположение холодильника в радиусе проема рессорного подвешивания (а) и литейные дефекты в сечении отливки «Рама боковая», изготовленной по исходной технологии: расчетное (б) и фактическое (в)

Выбор вариантов размещения наружных холодильников в зоне R40 проема рессорного подвешивания сделан на основании сравнения двух вариантов: вариант № 1 – холодильники массой 0,07 кг и 0,15 кг; вариант № 2 – холодильники массой 0,24 кг и 0,45 кг (рисунок 5.38).

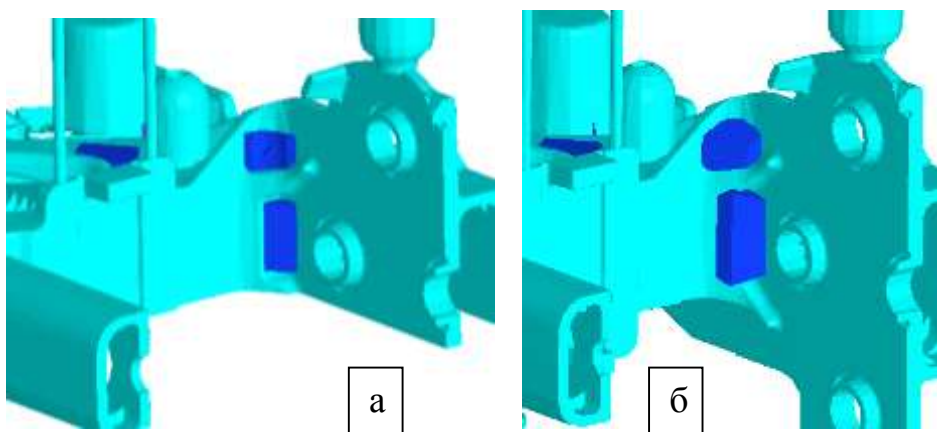


Рисунок 5.38 – Геометрические модели с вариантами № 1 (а) и № 2 (б) размещения холодильников для направленного охлаждения опасного сечения отливки «Рама боковая»

Результаты моделирования усадочных дефектов с указанием расчетного параметра усадки в сечениях отливки «Рама боковая» для вариантов размещения холодильников показаны на рисунке 5.39. На рисунках выделены границы холодильников и показаны в сравнении идентичные сечения для двух вариантов размещения холодильников.

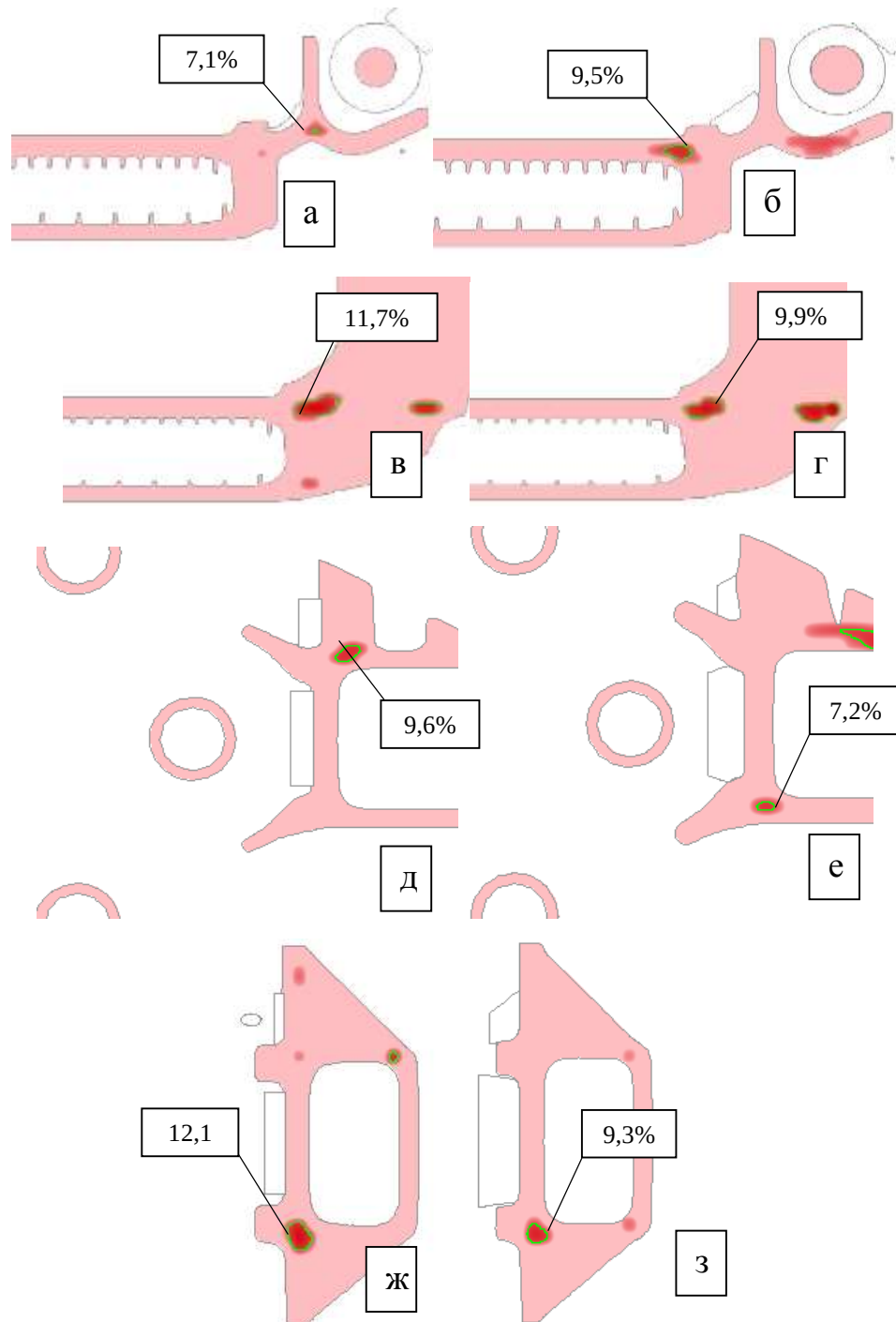


Рисунок 5.39 – Результаты компьютерного моделирования усадочных дефектов в сечении отливки «Рама боковая» для вариантов размещения холодильников № 1 (а, в, д, ж) и № 2 (б, г, е, з)

По результатам моделирования предпочтительным является вариант размещения наружных холодильников № 2, поскольку он уменьшает усадочный дефект в зоне 1. Для исключения усадочного дефекта требуется улучшение условий питания теплового узла за счет изменения прибыли.

Для исключения усадочных дефектов в кронштейне триангеля (зона 2) сравнению подвергнуты два размерных варианта исполнения внутреннего холодильника. Вариант № 1: диаметр $d=14$ мм, высота $l=160$ мм; вариант № 2: диаметр $d=22$ мм, высота $l=160$ мм. Результаты компьютерного моделирования усадочных дефектов для двух размерных вариантов внутреннего холодильника представлены на рисунке 5.40.

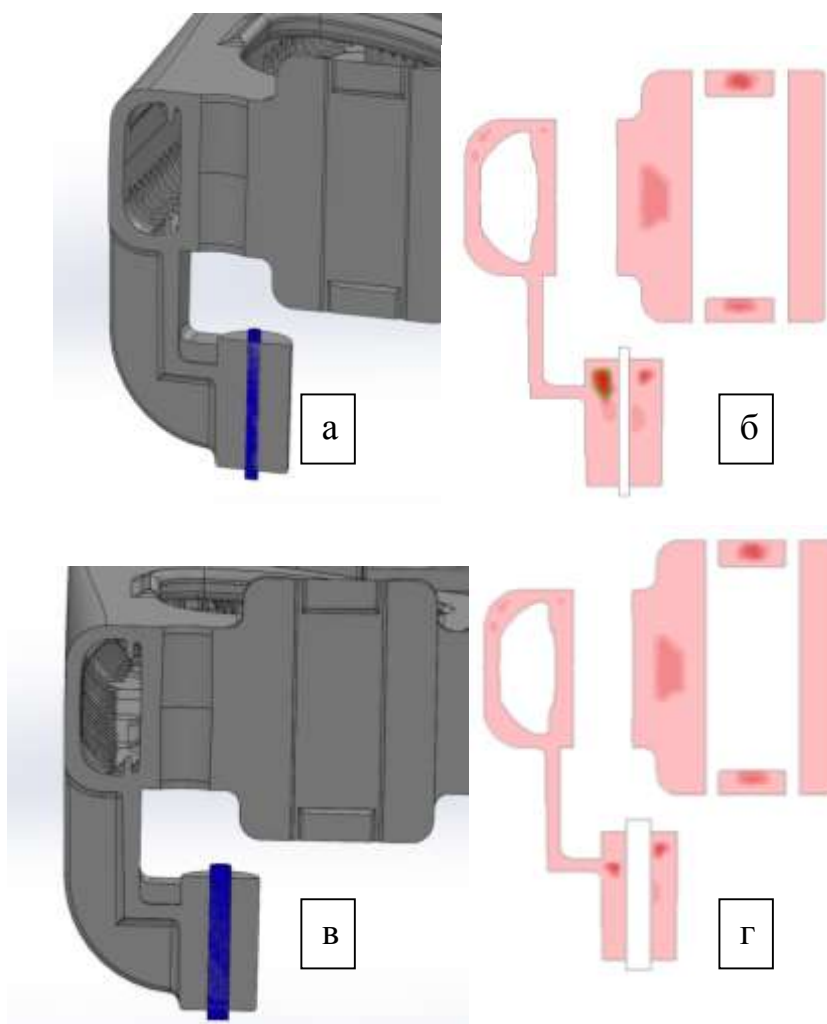


Рисунок 5.40 – Расположение холодильника в кронштейне триангеля (а, в) и усадочные дефекты в сечении отливки «Рама боковая» для размерных вариантов внутреннего холодильника № 1 (б) и № 2 (г)

По результатам компьютерного моделирования предпочтительным является вариант внутреннего холодильника № 2, поскольку холодильник большего диаметра разбивает концентрированную усадочную пористость в зоне 2 и снижает ее до допустимого уровня.

5.3.5 Применение технологических ребер и устранение трещин

Одним из наиболее эффективных методов предупреждения появления горячих трещин является установка технологических ребер, поскольку ребрение способствует рассредоточению усадочной деформации [120, 121]. Технологические ребра располагают в углах отливок через каждые 80-100 мм. Установка технологических ребер производится также в отдельных узлах отливки, испытывающих при затвердевании растягивающие усилия. Для предупреждения образования трещин в отливке «Рама боковая» предусмотрено более 100 ребер. Толщина ребер принимается в 4-6 раз меньше размера узла или толщины сопрягаемых стенок. Из-за незначительной толщины ребра охлаждаются быстрее стенок отливок и приобретают прочность, достаточную для сопротивления напряжениям, возникающим в отливке в процессе ее охлаждения.

Для предупреждения образования горячих трещин в тонкостенных отливках обращается также внимание на точную установку стержней в форме. Даже незначительное смещение стержня в форме (2-3 мм при толщине стенки 15 мм) дает разностенность отливок в пределах 12-20%, что также приводит к образованию горячих трещин. Установка стержней производится по специальным шаблонам, толщина которых соответствует размеру стенки отливки. Образованию трещин способствует также ранняя выбивка отливок из форм. Заводской опыт показал, что время выдержки крупных вагонных отливок после заливки форм до выбивки должно быть не менее 60 мин. Для предупреждения брака отливок по недоливам заливка форм в цехе крупного стального литья УВЗ сначала заливаются формы с отливками «Рама боковая» и «Балка надрессорная», требующими большей жидкотекучести расплава, а затем заливаются формы с отливками меньшего габарита.

5.3.6 Совместная работа технолога и конструктора по изменению конструкции литой детали

Дополнительные преимущества в разработке технологии литья с целью повышения качества литых деталей могут быть достигнуты при совместной работе конструктора и технолога. В рамках такой совместной работы конструкторского бюро литейной оснастки и конструкторского бюро вагонов УВЗ проведено сравнение технологичности двух вариантов конструкции литой детали, которые отличаются толщиной упоров-ограничителей в зоне R40 проема рессорного подвешивания. Результаты оценки усадочной пористости в сечении отливки «Рама боковая» показаны на рисунке 5.41.

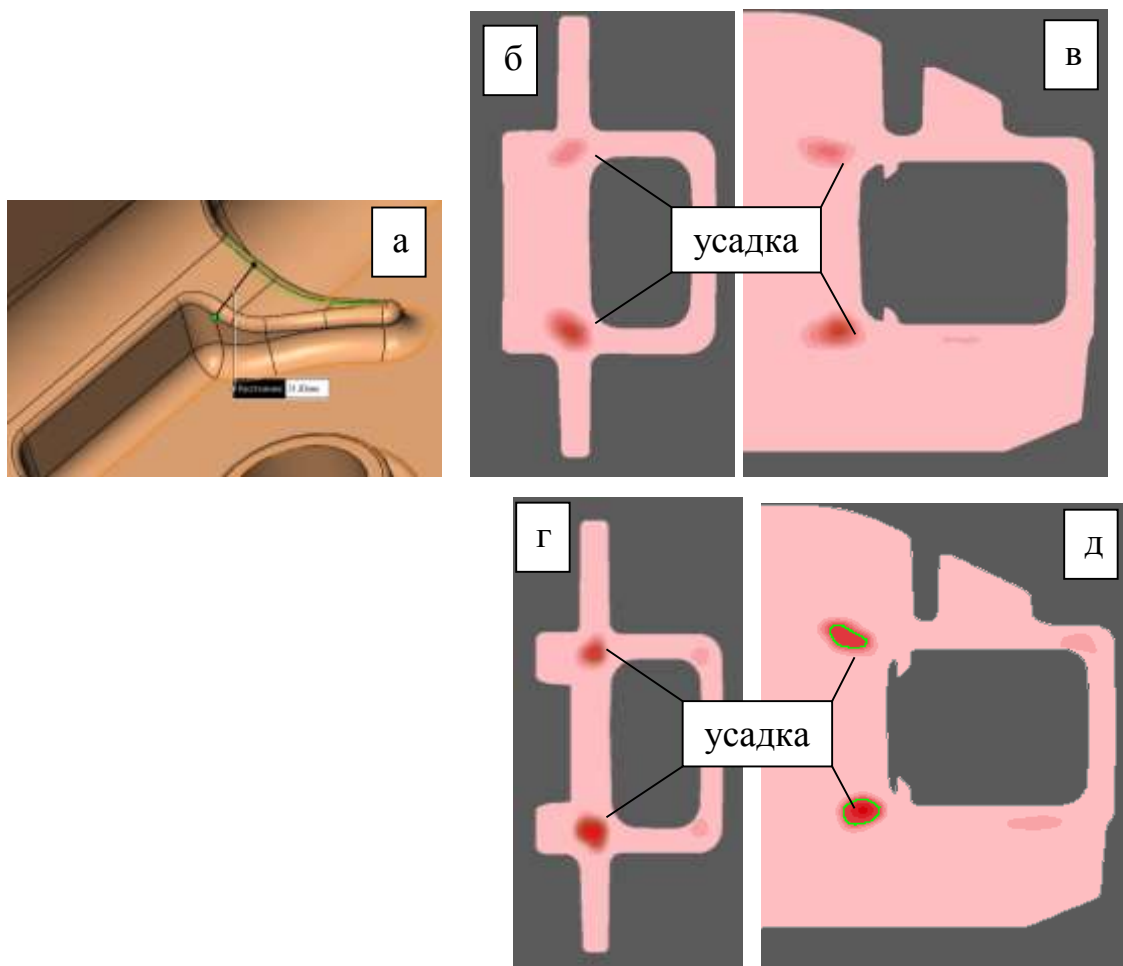


Рисунок 5.41 – Геометрическая модель (а) и усадочная пористость в сечениях для вариантов конструкции № 1 (б, в) и № 2 (г, д)

В варианте № 1 для упора задан линейный размер 32 мм, в варианте № 2 – 45 мм. По результатам компьютерного моделирования предпочтительным является вариант конструкции № 1, поскольку он обеспечивает меньший

объем усадочной пористости. Соответственно, более плотный металл в опасном сечении отливки при меньшей площади сечения благоприятно влияет на итоговый коэффициент запаса по прочности литой детали.

5.3.7 Результаты исследований по совершенствованию технологии изготовления отливки «Рама боковая»

Результаты проведенного нами компьютерного моделирования для большого количества вариантов технологии изготовления отливки «Рама боковая» позволяют сформулировать общие закономерности, которые могут быть использованы для дальнейшего совершенствования технологии:

- расположение питателей в отливке несущественно влияет на процессы кристаллизации и локализацию литейных дефектов, однако влияет на скорость заполнения и время кристаллизации в тепловых узлах отливки;
- чем дальше расположены питатели от тепловых узлов, тем меньше времени требуется на кристаллизацию этих узлов;
- для устранения усадочных раковин в отливке «Рама боковая» не достаточно изменить тип литниковой системы или увеличить размер холодильника, необходимо обеспечить питание отливки за счет выбора точно рассчитанных прибылей;
- применение наружных холодильников с увеличенной массой немного снижает значение параметра усадочной пористости в сечении, но не устраняет дефекты полностью, кроме того, наблюдается смещение зон усадочной пористости по сечению;
- неравномерное увеличение толщины стенок и ребер в отливке при изменении конструкции литой детали способствует увеличению расчетного параметра усадочной пористости.

Таким образом, с использованием верифицированной компьютерной модели разработана усовершенствованная технология изготовления отливки «Рама боковая», которая обеспечивает качество литой детали, соответствующее требованиям. Повышенное качество отливок «Рама

боковая», изготовленных по разработанной технологии, подтверждено периодическими испытаниями (рисунок 5.42).



Рисунок 5.42 – Отсутствие дефектов в сечениях отливки «Рама боковая», подтвержденное порезкой механическим способом в соответствии с требованиями предусмотренных периодических испытаний

Усовершенствованная технология имеет следующие отличия:

- подвод металла в «челюсти» буксового проема (4 питателя на отливку, соединённые технологической стяжкой, 2 отливки в форме) с использованием перепадов в литниковом ходе и 4 центробежных шлакоуловителей на форму;
- увеличенные внутренние холодильники в кронштейне триангеля (зона 2), диаметр $d=22$ мм, высота $l=160$ мм;
- две отводные прибыли, $d=110$ мм, $h=175$ мм, с питателем 60×60 мм и экзотермическим трехгранным стержнем в верхней части прибыли на наружных челюстях отливки;

- экзотермические оболочки CX-70, CX-3 и CX-2 в зонах радиуса R55, верхнего пояса и опорной площадки буксового проема;
- технологическое пополнение с внутренней стороны отливки и частично удаляемая прибыль диаметром $d=100$ мм и высотой $h=210$ мм в зоне радиуса проема рессорного подвешивания.

5.4 Совершенствование технологии изготовления отливки «Балка надрессорная»

5.4.1 Усадочные дефекты в исходной технологии изготовления отливки «Балка надрессорная»

Расположение усадочных дефектов в отливке «Балка надрессорная» при изготовлении по исходной технологии показаны на рисунке 5.43.

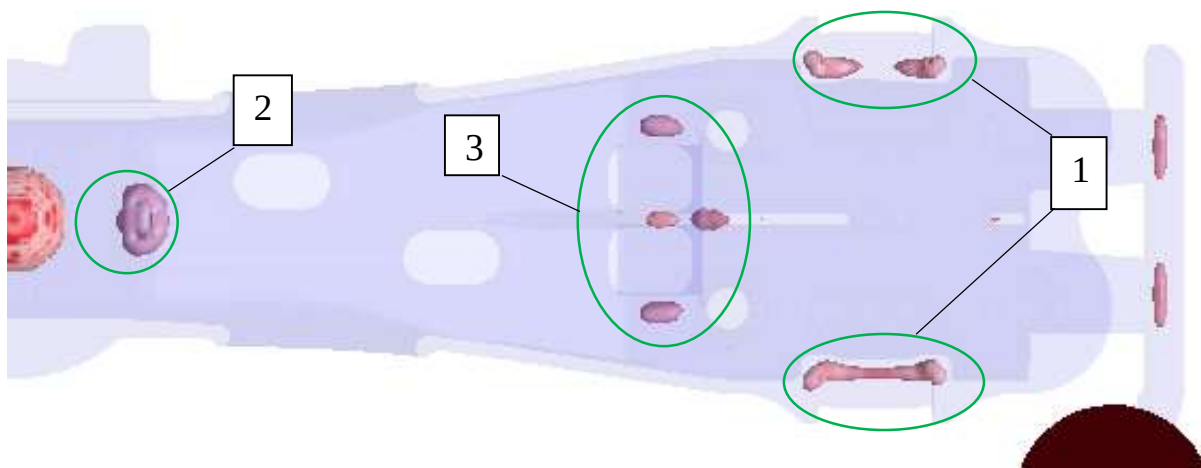


Рисунок 5.43 – Зоны образования усадочных дефектов в отливке «Балка надрессорная» при изготовлении по исходной технологии

Выявленные по результатам компьютерного моделирования в программе LVMFlow дефекты сгруппированы и обозначены порядковым номером для дальнейшей работы по их устранению. Расположение спрогнозированных дефектов подтверждается при проведении порезок механическим способом по актуальным сечениям и при визуальном осмотре отливок (рисунок 5.44).

Зона 1. Дефект в зоне наклонных фрикционных плоскостей (рисунок 5.45) иногда превышает размеры, допускаемые требованиями ГОСТ 32400-2013, фиксируются случаи выхода усадочной раковины на поверхность

отливки, тогда отливка забраковывается. Поэтому устранение данного дефекта необходимо для выполнения требований стандарта.



Рисунок 5.44 – Усадочные дефекты, обнаруженные в отливке «Балка надрессорная» при порезке: зона 1 (а, б); зона 3 (в, г)

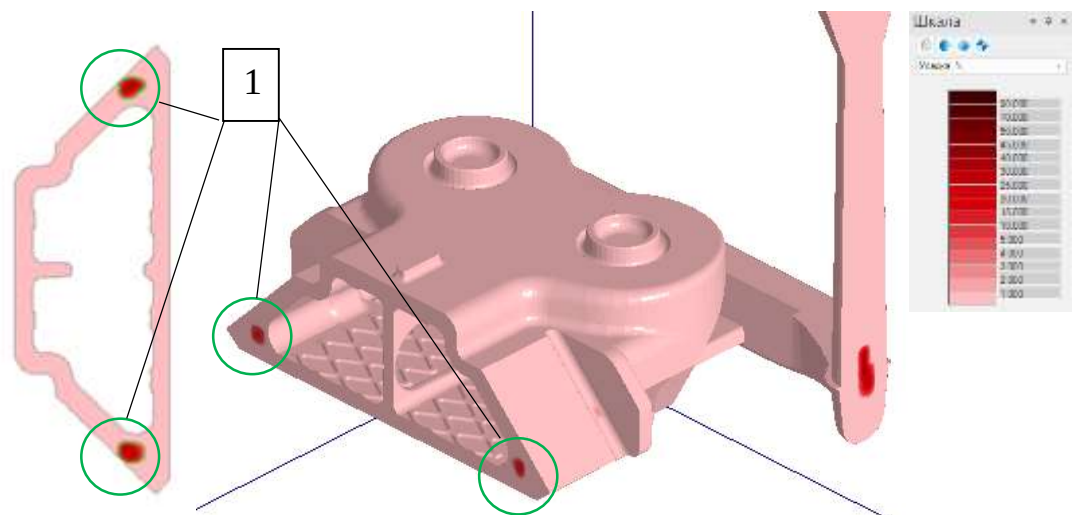


Рисунок 5.45 – Усадочный дефект в зоне наклонных фрикционных плоскостей (зона 1)

Зона 2. Усадочные дефекты во внутренних неудаляемых прибылях в зоне пятника (рисунок 5.46) иногда вскрывается при механической обработке, поэтому требуется уменьшить величину этого дефекта. Поскольку размеры

прибылей не подлежат изменению, необходимо предпринять меры по улучшению эффективности их работы.

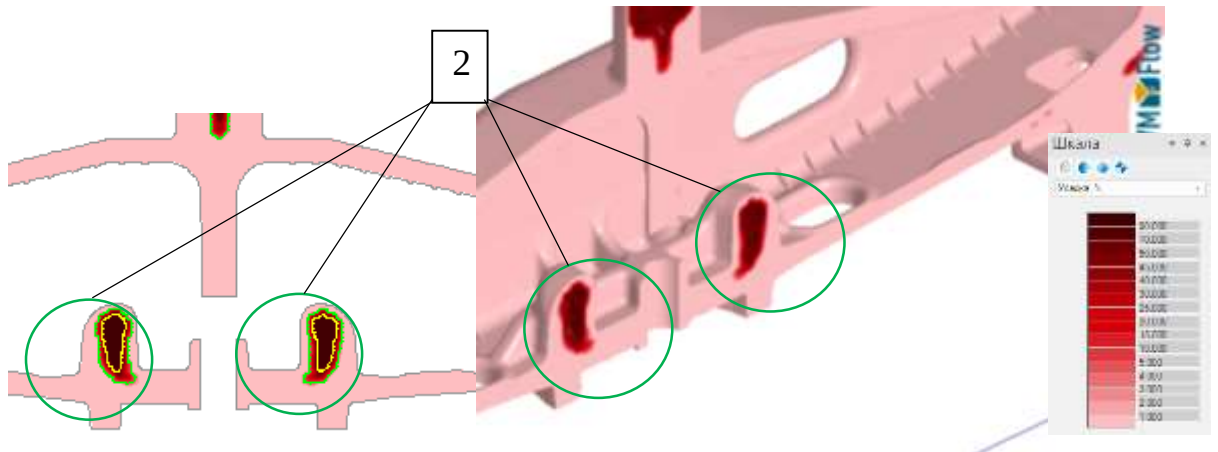


Рисунок 5.46 – Дефект во внутренних неудаляемых прибылях (зона 2)

Зона 3. Дефекты в зоне пересечения внутреннего ребра и нижней стенки, а также в основании площадки скользя (рисунок 5.47) находятся в ответственном сечении литой детали. Возникают случаи выхода данных дефектов на внутреннюю и наружную поверхности отливки, поэтому требуется их устранение.

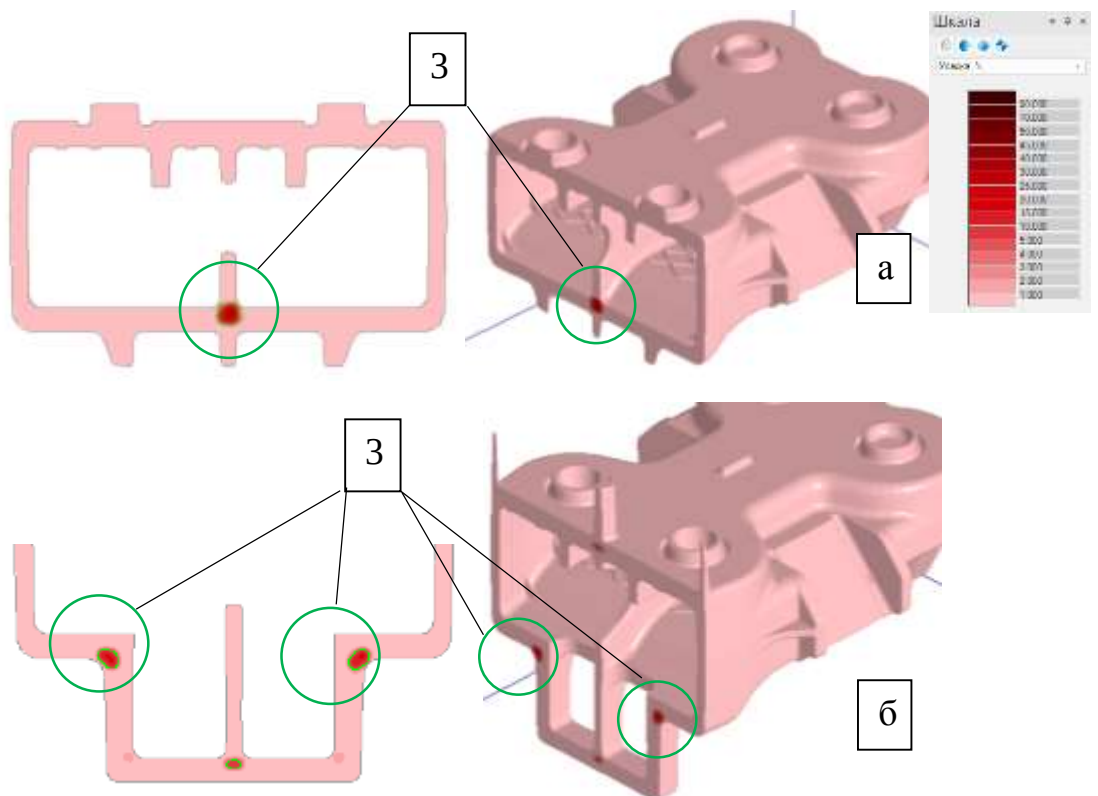


Рисунок 5.47 – Усадочные дефекты в зоне пересечения внутреннего ребра и нижней стенки (а), в основании площадки скользя (б) (зона 3)

5.4.2 Влияние конструктивных размеров на усадочную пористость

С целью оценки влияния геометрии тонких стенок на расположение литейных дефектов в отливке «Балка надressорная», было проведено компьютерное моделирование геометрии с двумя вариантами радиуса скругления во внутренней полости: вариант № 1 – $R=8$ мм; вариант № 2 – $R=30$ мм. Результаты компьютерного моделирования усадочных дефектов в сечениях отливки «Балка надressорная» представлены на рисунке 5.48.

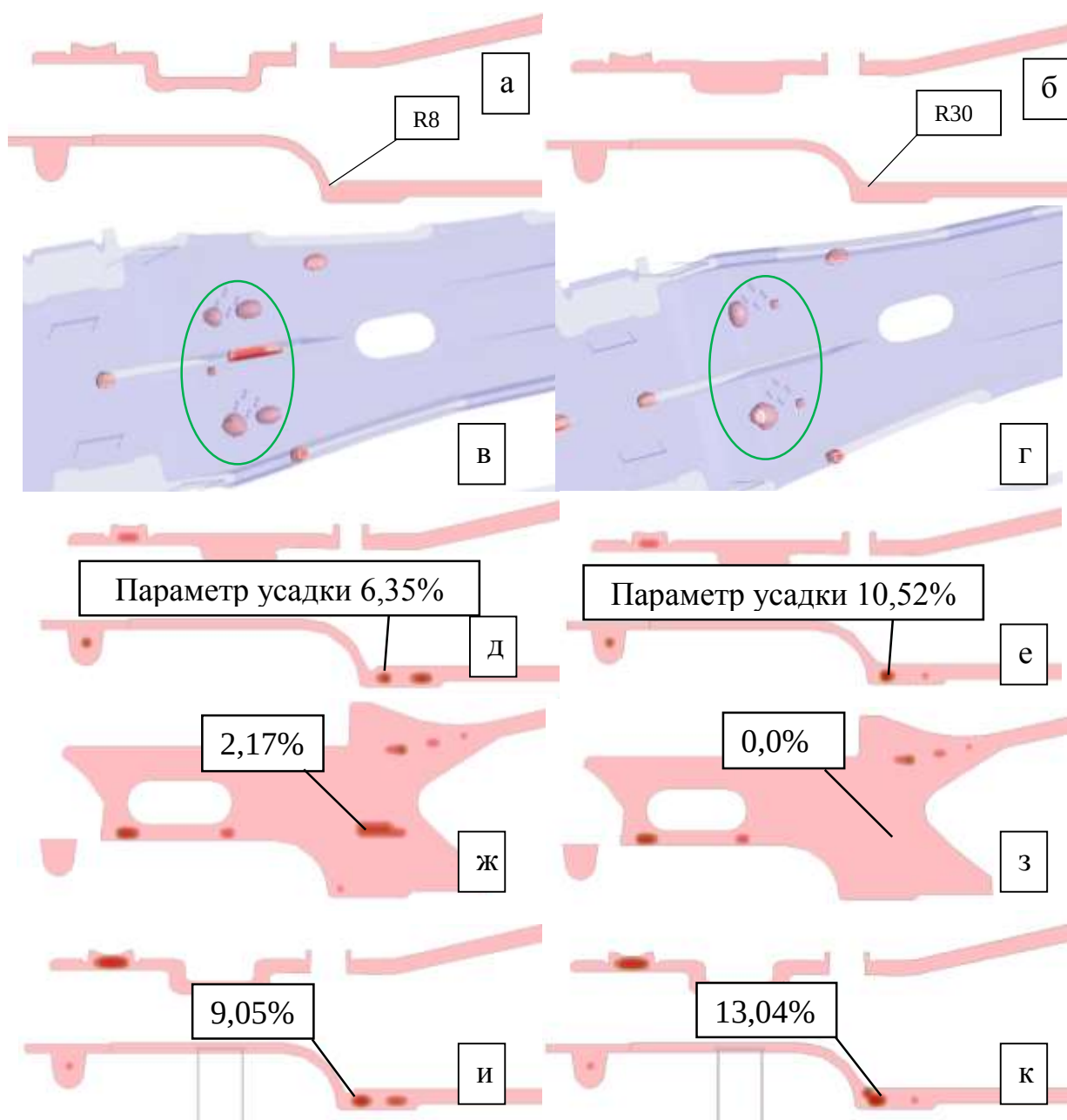


Рисунок 5.48 – Усадочные дефекты в сечениях отливки «Балка надressорная» для вариантов геометрии тонкой стенки № 1 (а, в, д, ж, и) и № 2 (б, г, е, з, к)

Исходные данные к компьютерному моделированию: температура заливки 1580 °С; диаметр выходного отверстия ковша 35 мм. По результатам компьютерного моделирования предпочтительным является вариант геометрии тонкой стенки № 1 с радиусом перехода $R=8$ мм, поскольку он обеспечивает меньший суммарный уровень усадочной пористости в стенках отливки «Балка надрессорная». Изменение радиуса скругления приводит к перераспределению усадочной пористости в окружающем объеме.

5.4.3 Устранение усадочных дефектов в отливке «Балка надрессорная»

Усадочные дефекты в зоне 1 устранены (рисунок 5.49) за счет применения 4 экзотермических прибыльных оболочек СХ-50 ($D=50$, $H=90$) с подрезными кольцами производства ТД «Волокнистые огнеупоры», конструкция которых специально разработана нами для установки на наклонные поверхности.

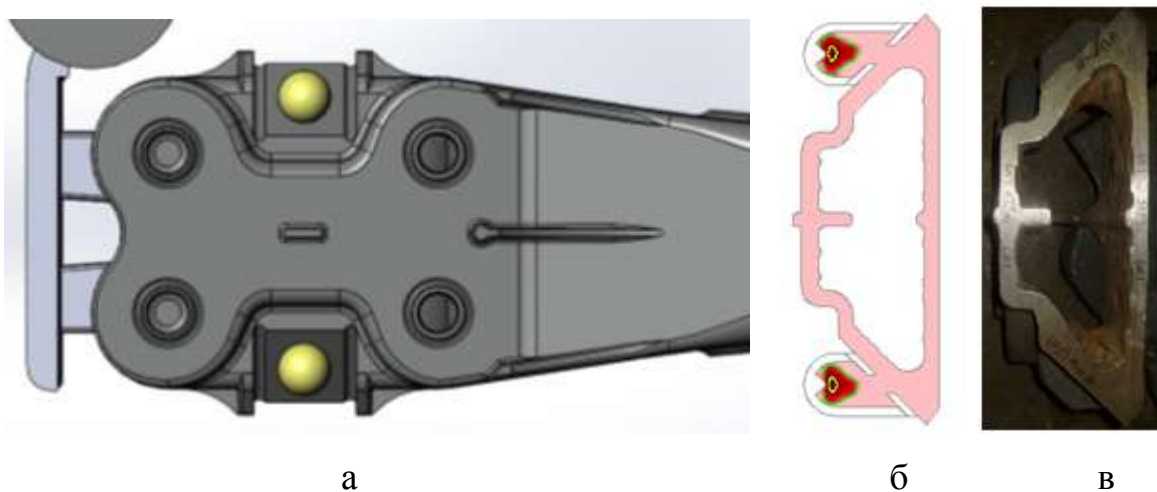


Рисунок 5.49 – Геометрическая модель (а) отливки «Балка надрессорная» с установленными прибылями; прогнозируемое (б) и фактическое (в) отсутствие усадочных дефектов в тонких стенках отливки

Для повышения эффективности питания теплового узла от неудаляемых прибылей в зоне 2 установлены экзотермические трехгранные стержни в верхней точке по оси симметрии (рисунок 5.50).

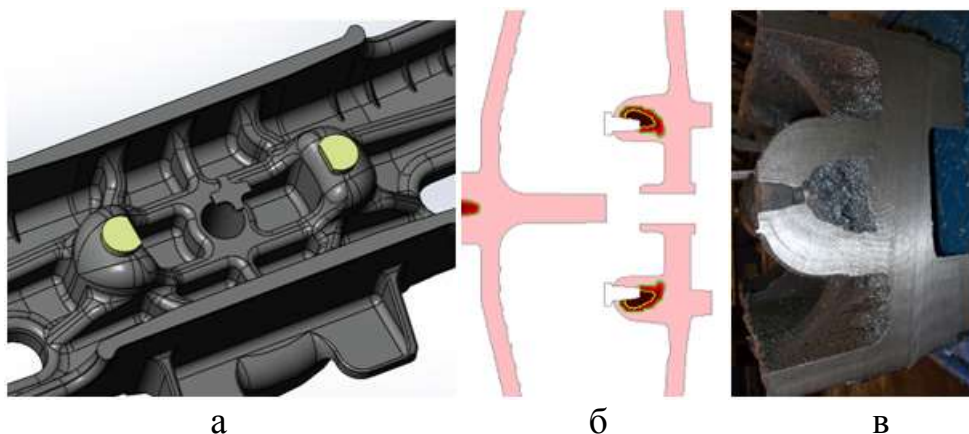


Рисунок 5.50 – Геометрическая модель (а) отливки «Балка надрессорная» с установленными экзотермическими трехгранными стержнями; прогнозируемое (б) и фактическое (в) отсутствие усадочных дефектов в тонких стенках отливки

Устранение усадочных дефектов в зоне 3 достигнуто за счет установки наружных холодильников размерами 51x37x34 (8 штук) массой 0,2 кг каждый, а также холодильников размерами 97x19x20 (4 штуки) массой 0,2 кг каждый (рисунок 5.51).

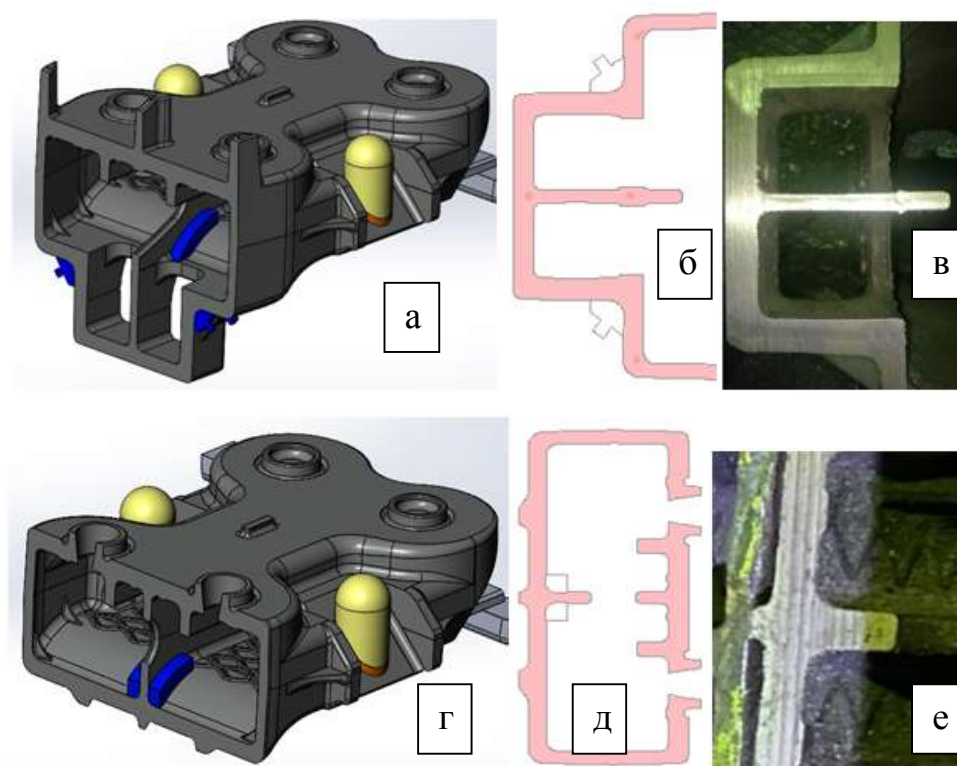


Рисунок 5.51 – Геометрическая модель отливки «Балка надрессорная» с установленными холодильниками в двух разрезах (а, г); прогнозируемое (б, д) и фактическое (в, д) отсутствие усадочных дефектов в тонких стенках отливки

Усовершенствованная технология изготовления отливки «Балка надрессорная» с учетом внесенных изменений обеспечивает повышенное качество отливки по усадочным дефектам, что подтверждается стандартными периодическими испытаниями отливок способом механической порезки (рисунок 5.52).



Рисунок 5.52 – Отсутствие дефектов в сечениях отливки «Балка надрессорная», подтвержденное порезкой механическим способом в соответствии с требованиями предусмотренных периодических испытаний

5.5 Выводы по главе 5

1. С использованием уточненной по свойствам формовочных материалов компьютерной модели выполнено исследование усадочных дефектов в отливках «Рама боковая» и «Балка надрессорная», по результатам компьютерного моделирования скорректированы технологии изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная». Усовершенствованные технологии апробированы в цехе крупного стального литья УВЗ.

2. В технологическую оснастку добавлены изоляционные оболочковые прибыльные вставки типа СХ, которые позволяют уменьшить объем прибыли и увеличить время затвердевания прибыли.

3. Для отливки «Рама боковая» в технологию внесены изменения: подвод металла по шлакоуловителю через центробежный шлакоуловитель и дальнейшим питанием в «челюсти» рамы; увеличенные внутренние холодильники в кронштейне триангеля (зона 2) диаметр $d=22$ мм, высота $l=160$ мм; две отводные прибыли $d=110$ мм, $h=175$ мм, питателем 60×60 мм и экзотермическим трехгранным стержнем в верхней части прибыли на наружных челюстях отливки; экзотермические оболочки СХ-70, СХ-3 и СХ-2 в зонах радиуса R55, верхнего пояса и опорной буксового проема; технологическое пополнение с внутренней стороны отливки, частично удаляемая прибыль диаметром $d=100$ мм и высотой $h=210$ мм в зоне радиуса проема рессорного подвешивания.

4. Для отливки «Балка надрессорная» в технологию внесены изменения: 4 экзотермические прибыльных оболочки СХ-50 ($D=50$, $H=90$) с подрезными кольцами, конструкция которых специально разработана для установки на наклонные поверхности фрикционных плоскостей; 2 экзотермических 3-гранных стержня на внутренних неудаляемых прибылях в зоне пятника; наружные холодильники размерами $51 \times 37 \times 34$ (8 штук) массой 0,2 кг каждый, наружные холодильники размерами $97 \times 19 \times 20$ (4 штуки) массой 0,2 кг каждый.

5. Эффективность внесенных в технологию изменений подтверждена типовыми производственными испытаниями отливок на соответствие требованиям ГОСТ 32400.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненной диссертационной работы имеют большую практическую ценность для УВЗ, поскольку позволили повысить качество крупногабаритных тонкостенных отливок, изготавливаемых из стали 20ГЛ способом литья в песчаные формы. Уровень заводского брака за последние 5 лет по отливкам «Рама боковая» (модель 578) снизился с 25,6 % до 8,1 %, по отливкам «Балка надрессорная» (модель 100) – с 24,5 % до 5 %. Таким образом удовлетворены повышенные требования со стороны РЖД к сроку службы литых деталей тележек грузовых вагонов и снижению технологических дефектов в них. Быстрое и эффективное совершенствование технологии стало возможным благодаря компьютерному моделированию в САПР литейной технологии LVMFlow от российского разработчика (МКМ, г. Ижевск), при поддержке которого в рамках данной диссертационной работы выполнен большой объем работы, направленный на развитие конкурентоспособного отечественного программного обеспечения для литейного производства. Применение отечественного программного обеспечения оказалось критическим фактором технического перевооружения конструкторского бюро литейной оснастки УВЗ в условиях жестких санкций, наложенных на предприятие зарубежными поставщиками.

1. Разработан расчетно-экспериментальный метод для пополнения и уточнения теплофизических свойств формовочных материалов в базе данных отечественной САПР литейной технологии LVMFlow, который включает экспериментальную базу и расчетный алгоритм для обработки экспериментальных данных. Экспериментальная часть метода реализуется в условиях литейного производства УВЗ, что позволяет фиксировать свойства холодно-твердеющих и песчано-глинистых смесей в составе литейной формы или на тестовых образцах в технологически обоснованный период времени после их изготовления. Расчетная часть метода основана на алгоритме многопараметрической оптимизации и реализована в виде программного кода с интерфейсной оболочкой. Разработанный метод обеспечивает существенное

уточнение результатов компьютерного моделирования технологий изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок в программной среде LVMFlow, что подтверждено сравнением результатов моделирования с наблюдаемыми усадочными дефектами в сечениях отливок после разрушающего контроля.

2. С использованием разработанного метода САПР сформирована база данных основных формовочных материалов, применяемых в литейном производстве УВЗ. Уточненные свойства материалов в базе данных программы LVMFlow способствуют повышению точности моделирования и проектирования технологий литья для всего спектра производимых предприятием отливок.

3. В программной среде LVMFlow разработана уточненная компьютерная модель технологии изготовления крупногабаритных тонкостенных отливок из стали 20ГЛ, для которой выбраны и проверены параметры расчетной сетки, граничные и начальные условия, а также теплофизические свойства литейной стали, материалов формы и стержней. Компьютерная модель с уточненными свойствами материалов, применяемых в литейном производстве УВЗ, проверена на тестовых, опытных и серийных отливках заводскими испытаниями способом механической порезки отливок. Показано, что уточненная компьютерная модель обеспечивает достоверное предсказание локализации усадочных дефектов в отливке при проведении вычислительных экспериментов.

4. Разработаны и внедрены в технологический процесс экзотермические стержни-вставки с геометрией погружной части в виде усеченной пирамиды. Показана высокая эффективность использования прибылей с разработанными вставками: время действия прибыли с экзотермической вставкой увеличивается до 25% по сравнению с аналогичной прибылью с экзотермическим стержнем вставкой с погружной частью в виде усеченного тела вращения.

5. По результатам проведения вычислительных экспериментов с уточненной компьютерной моделью процессов затвердевания отливки в песчаной форме, внесены изменения в оснастку для изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная». Усовершенствованные технологии обеспечили снижение брака по усадочным дефектам для отливок «Рама боковая» с 36% (2010 г.) до 3% (2020 г.), для отливок «Балка надрессорная» с 42% (2010г.) до 4% (2020 г.).

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования

Дальнейшую работу по тематике диссертации возможно продолжить в направлении изучения технологических трещин в отливках с применением методов компьютерного моделирования. Усадочная пористость может значительно сокращать начальный период образования трещин в условиях неоднородного охлаждения отливки. Поэтому результаты выполненной диссертационной работы в части постановки вычислительных экспериментов по анализу усадочных дефектов могут стать основой для выявления закономерностей формирования трещин и способов их устранения. В дополнение к теплофизическим свойствам материалов для изучения напряженно-деформированного состояния отливки в литейной форме требуются физико-механические свойства. Формирование таких свойств в температурном интервале около температуры солидус является нерешенной проблемой компьютерного моделирования литейных технологий.

В части развития методов САПР литейной оснастки и литейной технологии тему диссертационной работы можно развить в направлении создания подсистемы САПР, которая свяжет изменение свойств формовочных материалов с многофакторной вариацией структуры и характеристик составляющих компонентов. Такой подход требует длительной работы большой научной школы по развитию многих теоретических аспектов. Вместе с тем, следует отметить, что разработанный в данной диссертационной работе метод позволил в краткие сроки решить все основные проблемы качества крупногабаритных тонкостенных стальных отливок в условиях УВЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития транспортного машиностроения Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс] : Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 августа 2017 г. № 1756-р / Официальный сайт Правительства Российской Федерации. – Москва. – URL: <http://static.government.ru/media/files/klnxiLOfYHPRsEe6cD9NsI0KM32LMacz.pdf> (дата обращения: 01.10.2020).
2. Carter D. Improved quality truck castings / D. Carter, K. Gonzales, K. Jones, D. Sammon. – Washington : Office of research, development and technology, 2016. – 54 p.
3. Монастырский А. В. Излом боковой рамы тележки грузового вагона. Анализ технологии производства, пути устранения дефектов / А. В. Монастырский, В. М. Бубнов, С. П. Котенко, В. В. Балакин // Литейное производство. – 2012. – №11. – С. 21-25.
4. Воронин Ю. Ф. О повышении качества и надежности железнодорожной отливки «рама боковая» / Ю. Ф. Воронин, С. Ю. Воронин // Литейное производство. – 2012. – № 5. – С. 13-15.
5. ГОСТ 32400-2012. Рама боковая и балка надрессорная литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 61 с.
6. Воронин Ю. Ф. Анализ качества отливок «Рама боковая» для вагонов РЖД / Ю. Ф. Воронин // Техника железных дорог. – 2010. – № 4 (12). – С. 51-55.
7. Буданов Е. Н. Выбор технологии изготовления стальных отливок для железнодорожного вагонного парка / Е. Н. Буданов // Литейное производство. – 2004. – № 8. – С. 1-14.
8. Буданов Е. Н. Модернизация литейных производств арматурных отливок в странах Восточной Европы / Е. Н. Буданов // Литейщик России. – 2006. – № 3. – С. 25-31.
9. Котлягин Е. Г. Производство стальных железнодорожных отливок по вакуумно-пленочной технологии изготовления литейных форм на ООО «ВКМ-Сталь» / Е. Г. Котлягин // Литейщик России. – 2014. – № 1. – С. 16-17.

10. Смирнова Т.А. О причинах низкого качества боковых рам и надрессорных балок тележек / Т. А. Смирнова, А. В. Сухов, В. Б. Беловодский, Б. В. Борщ, Т. Е. Конькова // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2011. – № 1. – С. 22-24.
11. Альбом – справочник изломов и дефектов боковых рам тележек грузовых вагонов на железных дорогах России за 2006-2017 годы. – Москва : Проектно-конструкторское бюро вагонного хозяйства (ПКБ ЦВ) ОАО «РЖД», 2017. – 239 с.
12. Горленко А. М. Методика геометрического моделирования, анализа напряженно-деформированного состояния и автоматизированного контроля корпусных деталей подвижного железнодорожного состава / А.М. Горленко, Ф. В. Медведев, И.В. Колмогорцев // САПР и графика. – 2009. – № 7. – С. 91-94.
13. Козлов Л. Я. Производство стальных отливок: учебник для вузов / Л. Я. Козлов, В. М. Колокольников, К. Н. Вдовин, Э. Б. Тен; под ред. Л. Я. Козлова. – Москва : МИСИС, 2003. – 352 с.
14. Дубицкий Г. М. Литниковые системы / Г. М. Дубицкий. – Свердловск ; Москва : Машгиз, 1962. – 256 с.
15. Рабинович Б. В. Введение в литейную гидравлику / Б. В. Рабинович. – Москва : Машиностроение, 1966. – 216 с.
16. Рыжиков А. А. Теоретические основы литейного производства / А. А. Рыжиков. – Москва : Машгиз, 1961. – 331 с.
17. Гуляев Б. Б. Литейные процессы / Б. Б. Гуляев. – Москва : Машгиз, 1960. – 331 с.
18. Нехендзи Ю. А. Стальное литье / Ю. А. Нехендзи. – Москва : Металлургиздат, 1948. – 766 с.
19. Василевский П. Ф. Технология стального литья / П. Ф. Василевский. – Москва : Машиностроение, 1974. – 408 с.
20. Василевский П. Ф. Литниковые системы стальных отливок / П. Ф. Василевский. – Москва : МАШГИЗ, 1956. – 163 с.
21. Голод В. М. Теория, компьютерный анализ и технология стального литья / В. М. Голод, В. А. Денисов; под общ. ред. В. М. Голода. – СПб: ИПЦ СПГУТД, 2007. – 610 с.

22. Бидуля П. Н. Технология стальных отливок / П. Н. Бидуля. – Москва : Metallurgizdat, 1961. – 352 с.
23. Коротченко А. Ю. Развитие научных и технологических основ получения фасонных литых заготовок в песчаных формах без усадочных дефектов и горячих трещин : спец. 05. 16. 04 «Литейное производство» : дис. ... д-ра техн. наук / А. Ю. Коротченко. – Москва, 2014. – 306 с.
24. Солдатов В. Г. Применение модифицирования для повышения эксплуатационных свойств отливок из стали 20ГЛ Текст. / В. Г. Солдатов, И. К. Кульбовский // Заготовительные производства в машиностроении. – 2004. – № 4. – С. 5-7.
25. Сенько В. И. Анализ причин повреждения и возможности продления срока службы боковых рам тележек грузовых вагонов / В. И. Сенько, М. И. Пастухов, С. В. Макеев, И. Ф. Пастухов // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2010. – № 4. – С. 13-18.
26. Пастухов И. Ф. О влиянии литейных дефектов на сопротивление усталости литых деталей / И. Ф. Пастухов, М. И. Пастухов // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2012. – № 3. – С. 11-18.
27. Попов, С. И. Выбор критерия для оценки влияния литейных дефектов на циклическую прочность деталей тележек грузовых вагонов // С. И. Попов, Н. А. Худякова // Повышение надежности и совершенствование ремонта вагонов : Сборник научных трудов ВНИИЖТ. – Москва, 1982. – Вып. 652. – С. 115-120.
28. Плоткин В. С. К оценке запасов усталостной прочности надрессорных балок и боковых рам тележки ЦНИИ-ХЗО по результатам полных усталостных испытаний / В. С. Плоткин [и др.] // Сборник научных трудов ВНИИВ. – Москва, 1978. – Вып. 35. – С. 41–47.
29. Евлампиев А. А. О технологичности конструкции отливки рама боковая / А. А. Евлампиев, Е. А. Чернышов, М. А. Шведов, А. В. Королев // Литейное производство. – 2013. – №9. – С. 16-19.
30. Jolly M. R. Casting Simulation: How well do reality and virtual casting match? A state of the art review / M. R. Jolly, J. C. Gebelin // International Journal of Cast Metals Research. – 2002. – V. 14(5). – P. 303-313.

31. Bhatt G. Usage of an integrated CAD/CAE/CAM system in foundries / G. Bhatt // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2013. – V. 2(6). – P. 2681-2685.
32. Монастырский В. П. Моделирование образования макропористости и усадочной раковины в отливке / В. П. Монастырский // Литейщик России. – 2011. – №10. – С. 16-21.
33. Сабиров Д. Х. Современные методы проектирования и изготовления литейной оснастки / Д. Х. Сабиров, А. А. Абрамов, Л. Ю. Денисов // Литейное производство. – 2004. – № 7. – С. 25-29.
34. Zheng J. Low carbon, high efficiency and sustainable production of traditional manufacturing methods through process design strategy: Improvement process for sand casting defects / J. Zheng, X. Zhou, Y. Yu, J. Wu, W. Ling, H. Ma // Journal of Cleaner Production. – 2020 – V. 253. – AN 119917.
35. Patnaik L. Die casting parameters and simulations for crankcase of automobile using MAGMAsoft / L. Patnaik, I. Saravanan, S. Kumar // Materials Today: Proceedings. – 2020 – V. 22. – P. 563–571.
36. Greß T. Production of aluminum AA7075/6060 compounds by die casting and hot extrusion / T. Greß, T. Mittler, H. Chen, J. Stahl, S. Schmid, N. B. Khalifa, W. Volk // Journal of Materials Processing Technology. – 2020 – V. 280. – AN 116594.
37. Wang J. Re-thinking design methodology for castings: 3D sand-printing and topology optimization / S. R. Sama, G. Manogharan // International Journal of Metalcasting. – 2019. – V. 13. – P. 2-17.
38. Батышев К. А. Использование современных систем моделирования и контроля для производства отливок ответственного назначения / В. А. Кателин, К. Г. Семенов, С. Н. Панкратов, С. В. Колосков, А. В. Васияров // Современные материалы, техника и технологии. – 2018. – №17(16). – С. 4-10.
39. Вдовин К. Н. Моделирование процессов кристаллизации и структурообразования прокатного валка из заэвтектидной стали / К. Н. Вдовин, Н. А. Феоктистов, И. В. Михалкина, Д. А. Горленко, А. И. Норец // Теория и технология металлургического производства. – 2020. – № 1 (32). – С. 18-25.

40. Малькова Н. Ю. Анализ литейных особенностей геометрии отливки, выявление горячих зон по распределению температуры при виртуальной кристаллизации без прибылей в программе LVMFlow / Е. А. Кошелева // Ползуновский альманах. – 2019. – № 3. – С. 67-69.
41. Огородникова О. М. Компьютерное моделирование литейной технологии в программной среде LVMFlow / О. М. Огородникова. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2018. – 38 с.
42. Вольнов И. Н. Системы автоматизированного моделирования литейных процессов – состояние, проблемы, перспективы / И. Н. Вольнов // Литейщик России. – 2007. – № 6. – С. 14-17.
43. Никаноров А. В. Сравнительный анализ компьютерных программ для моделирования литейных процессов / А. В. Никаноров // Вестник ИрГТУ. Metallurgy and materials science. – 2018. – Т. 22(11). – С. 209-217.
44. Сушко Т. И. Анализ причин брака при производстве стальных корпусных отливок посредством СКМ ЛП LVM Flow / Т. И. Сушко, А. С. Леднев, Т. В. Пашнева, И. Г. Руднева // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2012. – № 1. – С. 26-29.
45. Огородникова О.М. Компьютерный инженерный анализ / О. М. Огородникова. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2008. – 204 с.
46. Zheng J. A low carbon process design method of sand casting based on process design parameters / B. Huang, X. Zhou // Journal of Cleaner Production. – 2018. – V. 197. – P. 1408-1422.
47. Ayar M.S. Simulation and experimental validation for defect reduction in geometry varied aluminium plates casted using sand casting / V.S. Ayar, P. M. George // Materials Today: Proceedings. – 2020. – V. 27. – P. 1422–1430.
48. Wang J. Numerical simulation and process optimization for producing large-sized castings / J. Wang, X. Sun, Y. Guan, P. Wang, H. Li, L. Bai, X. Sun// China Foundry. – 2008. – V. 5 (3). – P. 179-185.
49. Kermanpur A. Influence of mould design on the solidification of heavy forging ingots of lowalloy steels by numerical simulation / A. Kermanpur, M. Eskandari, H. Purmohamad, M. A. Soltani, R. Shateri // Materials and Design. – 2010. – V. 31 (3). – P.1096-1104.

50. Sanga B. A novel technique for reducing macrosegregation in heavy steel ingots / B. Sanga, X. Kangaand, D. Li // Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – V. 210 (4). – P. 703-711.
51. Макасин В. А. Опыт применения систем автоматизированного моделирования литейных процессов в условиях ООО «Промтрактор-Промлит» / В. А. Макасин // Литейное производство. – 2009. – № 7. – С. 37-40.
52. Болотин М. М. Отказы и срок службы грузового вагона / М. М. Болотин, В. Г. Воротников // Мир транспорта. – 2012. – № 2. – С. 152-161.
53. Глебов С. М. Оптимизация технологии изготовления отливок «Балка надрессорная» тележек грузовых вагонов с применением компьютерного моделирования литейных процессов / С. М. Глебов, М. А. Пречесный, А. В. Якушев // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 2 (33). – С. 63-65.
54. Коротченко А. Ю. Влияние условий заливки на формирование служебных свойств отливки «рама боковая» / А. Ю. Коротченко, Н. А. Никифорова, Е. Д. Демьянов, Н. С. Ларичев // Литейщик России. – 2014. – № 1. – С. 40-43.
55. Мельников А. П. Производство крупных стальных тонкостенных отливок для грузовых железнодорожных вагонов с использованием современных литейных технологий / А. П. Мельников, Д. М. Кукуй, А. В. Черепович // Литье и металлургия. – 2008. – Т. 4 (40). – С. 71 – 77.
56. Михайлов В. Н. Применение компьютерного моделирования стальной отливки «Рама боковая» с целью выявления литейных дефектов / В. Н. Михайлов, Д. С. Краснятов // Вестник Брянского ГТУ. – 2008. – №2 (18). – С. 117-118.
57. Сушко Т. И. Моделирование процессов затвердевания крупногабаритной тонкостенной стальной корпусной отливки с совершенствованием технологии изготовления / Т. И. Сушко, А. В. Бучнев, В. В. Турищев, Т. В. Пашнева // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6 (12). – С. 44-47.
58. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки / Г. Ф. Баландин. – Москва : Машиностроение, 1976. – 328 с.

59. Вейник А. И. Теория затвердения отливки / А. И. Вейник. – Москва : Машгиз, 1960. – 435 с.
60. Stefanescu D. M. Science and engineering of casting solidification / D. M. Stefanescu. – New York : Springer, 2009. – 413 p.
61. Gur C. H. Handbook of thermal process modeling of steel / C. H. Gur, J. Pan. – New York : CRC Press, 2009. – 754 p.
62. Обухов А. А. Численное решение задачи определения температурной зависимости теплофизических параметров твердых сред / А. А. Обухов, Т. А. Новикова, В. Г. Лебедев, В. И. Ладьянов, А. В. Обухов // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 90 (12). – С. 2013-2021.
63. Quested P. N. The prediction of thermophysical properties for modeling solidification of metallic melts / P. N. Quested, R. F. Brooks, B. J. Monaghan // High Temperature Materials and Processes. – 2003. – V. 22 (5-6). – P. 247-256.
64. Дульнев Г. Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричник. – Ленинград : Энергия, 1974. – 264 с.
65. Bounds S. A computational model for defect prediction in shape castings based on the interaction of free surface flow, heat transfer, and solidification phenomena bounds / S. Bounds, G. Moran, K. Pericleous, M. Cross, T.N. Croft // Metallurgical and materials transactions B. – 2000. – V. 31B. – P. 515-527.
66. Сушко Т. И. Диагностика литейных дефектов при литье в песчаные формы посредством СКМ ЛП LVM Flow / Т. И. Сушко, С. А. Еремин, В. В. Турищев, Т. В. Пашнева // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6 (12). – С. 72-75.
67. Бройтман О. Компьютерное моделирование процессов формирования крупных стальных кузнечных слитков / О. Бройтман, А. Монастырский, И. Иванов, А. Мальгинов, Е. Макарычева, Д. Сараев // САПР и графика. – 2012. – № 5. – С. 76-83.
68. Guo Z. Modelling of materials properties and behaviour critical to casting simulation / Z. Guo, N. Saunders, A.P. Miodownik, J.-Ph. Schille // Materials Science and Engineering. – 2005. – V. 413 – 414A. – P. 465–469.
69. Физические величины: Справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

70. Коновалов А. В. Расчетное определение температурных зависимостей теплофизических свойств структурных составляющих низколегированной стали по ее химическому составу / А. В. Коновалов, А. С. Куркин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79 (9). – С. 41-45.
71. Guo Z. Modelling of material properties – aviable solution to the lack of material data in casting simulation / Z. Guo, N. Saunders, E. Hepp, J.-Ph. Schillé // The 5th Decennial International Conference on Solidification Processing, 23 –25 July, 2007. – Sheffield, U.K., 2007. – P. 1-6.
72. Моделирование литейных процессов: что и как выбрать? / ЗАО «НПО МКМ», ООО «ПроМодель» // Литейщик России. – 2010. – №5. – С.11-14.
73. Бройтман О. А. Современные методы испытаний формовочных материалов и песчано-смоляных смесей / О. А. Бройтман, Э. Д. Бусби, М. А. Иоффе // Литейщик России. – 2009. – № 8. – С. 20-34.
74. Голод В. М. Компьютерный анализ литейной технологии, проблемы его информационного обеспечения и адаптации к условиям производства / В. М. Голод // Вестник Удмуртского университета. Серия «Физика. Химия». – 2008. – Т. 67 (1). – С. 67-87.
75. Бройтман О. А. Численный анализ процесса теплообмена и определение эффективных теплофизических свойств формовочных материалов на основе построения их структурных моделей спец. 05.16.04 «Литейное производство» : дис. ... канд. техн. наук / О. А. Бройтман. – Санкт-Петербург, 2006. – 125 с.
76. Zych J. Thermal conductivity of molding sand with chemical binders, attempts of its increasing / J. Zych, J. Mocek, T. Snopkiewicz, L. Jamorowicz // Archives of metallurgy and materials. – 2015. – V. 60 (1). – P. 351-357.
77. Трухов А. П. Технология литейного производства: литье в песчаные формы / А. П. Трухов, Ю. А. Сорокин, М. Ю. Ершов, Б. П. Благонравов, А. А. Минаев, Э. Ч. Гини. – Москва : Издательский центр «Академия», 2005. – 528 с.
78. Васькин В. Математическое моделирование и литейные технологии / В. Васькин, В. Кропотин, А. Обухов // CAD master. – 2002. – № 4. – С. 35-39.

79. Khan M. A. A. A comparative study of simulation software for modeling metal casting process / M. A. A. Khan, A. K. Sheikh // International Journal of Simulation Modelling. – 2018. – V. 17 (2). – P. 197-209.
80. Neves S. The sensibility of thermophysical property data for simulating casting processes / S. Neves, W. Shafer, P. N. Hansen // International journal of thermophysics. – 2002. – V. 23 (5). – P. 1391-1399.
81. **Мартыненко С. В.** Компьютеризация и автоматизация процесса проектирования литейной технологии в системе инженерного анализа Simtec/WinCast на ФГУП «ПО Уралвагонзавод» / С.В. Мартыненко, Е. В. Пигина // Инженерный журнал. – 2008. – №1. – С. 15-18.
82. **Мартыненко С. В.** Опыт внедрения системы компьютерного моделирования литейных процессов на ОАО «НПК Уралвагонзавод» / С. В. Мартыненко, Е. С. Будяк, О. М. Огородникова // Труды XI съезда литейщиков России, 16-20 сентября 2013 г. – Нижний Тагил, 2013. – С. 367-370.
83. Официальный сайт разработчика программного обеспечения LVMFlow / НПО «МКМ». – Ижевск. – URL: http://wp_lvm.mkmssoft.ru (дата обращения: 01.10.2020).
84. Пигина Е. В. Экономический эффект от применения специализированного программного обеспечения при отработке технологии изготовления отливок различного назначения / Е. В. Пигина, **С. В. Мартыненко** // ИТ-Бизнес-Металл : Материалы VII международной научно-практической конференции, 21-23 июня 2005 г. – Москва, 2005. – С. 80-82.
85. **Мартыненко С. В.** Моделирование литейных процессов и конструирование модельной оснастки / Мартыненко С. В. // Металлургия для машиностроения : Труды второй международной научно-практической конференции УГТУ-УПИ, 27 ноября - 1 декабря 2006 г. – Екатеринбург, 2006. – С. 38.
86. Патент 2731710 РФ, МПК C21C 5/04 (2020.02). Шихта для выплавки стали в основной мартеновской печи : № 2020110111 : заявл. 11.03.2020: опубл. 08.09.2020 / Филиппенков А. А., Цикарев В. Г., Троп Л. А., Байков Х. Х., **Мартыненко С. В.**, Панышин П. А., Чашин А. А., Чернов А. В.; заявитель и патентообладатель АО «НПК Уралвагонзавод». – Изобретения. Полезные модели. – Бюл. № 25. – 7 с.

87. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах / В. Е. Зиновьев. – Москва : Металлургия, 1989. – 384 с.
88. Солнцев Ю. П. Литейные хладостойкие стали / Ю. П. Солнцев, А. К. Андреев, Р. И. Гречин. – Москва : Металлургия, 1991. – 176 с.
89. Pehlke R. D. Summary of thermal properties for casting alloys and mold materials / R. D. Pehlke, A. Jeyarajan, H. Wada. – Lansing : Michigan University, 1982. – 166 p.
90. Бречко А. А. Формовочные и стержневые смеси с заданными свойствами / А. А. Бречко, Г. Ф. Великанов. – Ленинград : Машиностроение, 1982. – 216 с.
91. Боровский Ю. Ф. Формовочные и стержневые смеси / Ю. Ф. Боровский, М. И. Шацких. – Ленинград : Машиностроение, 1980. – 86 с.
92. Жуковский С. С. Технология литейного производства: Формовочные и стержневые смеси / С. С. Жуковский. – Брянск : БГТУ, 2002. – 470 с.
93. Жуковский С. С. Холоднотвердеющие связующие и смеси для литейных стержней и форм: справочник / С. С. Жуковский. – Москва : Машиностроение, 2010. – 256 с.
94. Грузман В. М. Исследование тонких пленок связующего / В. М. Грузман, О. Д. Кондаков, **С. В. Мартыненко** // Литейное производство. – 2003. – №12. – С. 16-18.
95. Грузман В. М. Исследование пескострельного способа уплотнения стержневых смесей // В. М. Грузман, **С. В. Мартыненко** / Труды седьмого съезда литейщиков России, 23- 27 мая 2005 г. – Новосибирск, 2005. – Т. 2. – С. 279.
96. **Мартыненко С. В.** Разработка оборудования для подготовки оборотной смеси в кипящем слое // С. В. Мартыненко, В.М. Грузман / Материалы научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГТУ-УПИ, 7-10 декабря 2004 г. – Екатеринбург, 2004. – С. 200.
97. Огородникова О. М. Компьютерное моделирование горячих трещин в литых деталях/ О. М. Огородникова, Е. В. Пигина, **С. В. Мартыненко** // Литейное производство. – 2007. – № 2. – С.27-30.
98. **Мартыненко С. В.** Использование компьютерных методов для повышения качества крупногабаритных тонкостенных стальных отливок / С. В. Мартыненко, О. М. Огородникова, В. М. Грузман // Литейное производство. – 2009. – № 11. – С. 21-26.

99. **Мартыненко С. В.** Состояние и уровень технологических процессов в литейном производстве АО «НПК Уралвагонзавод» / С. В. Мартыненко // Материалы XII Научно-промышленного форума «Техническое перевооружение машиностроительных предприятий России», 25-27 апреля 2017 г. – Екатеринбург, 2017. – С. 54-58.
100. Ogorodnikova O. M. Application of the Levenberg–Marquardt algorithm in computer simulation of cast defects / O. M. Ogorodnikova, **S. V. Martynenko** // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – V. 51, № 5. – P. 315–319.
Огородникова О. М. Применение алгоритма Левенберга-Марквардта в компьютерном моделировании литейных дефектов / О. М. Огородникова, **С. В. Мартыненко** // Дефектоскопия. – 2014. – № 5. – С. 65-70.
101. Press W. H. Numerical recipes. The art of scientific computing / W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery. – New York: Cambridge University Press, 2007. – 1262 p.
102. Ogorodnikova O. M. Reconstruction of thermo-physical properties to improve material database for casting simulation / O. M. Ogorodnikova, S.V. Yeltsin, **S. V. Martynenko** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 971. – AN 032089.
103. Огородникова О. М. Расчетно-экспериментальная корректировка баз данных для компьютерного моделирования литейных технологий // О. М. Огородникова, **С. В. Мартыненко** / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – Т.81. (10). – С.40-43.
104. **Мартыненко С. В.** Формирование базы данных реальных технологических материалов АО «НПК «Уралвагонзавод» с целью увеличения достоверности инженерных расчетов в СКМ ЛП LVMFlow / С. В. Мартыненко. Е. С. Зверева // Материалы научно-практической конференции молодых специалистов АО «НПК Уралвагонзавод», 16-17 ноября 2017 г. – Нижний Тагил, 2017. – С. 37-44.
105. Огородникова О. М. Прогнозирование кристаллизационных трещин в стальных отливках / О. М. Огородникова, **С. В. Мартыненко**, В. М. Грузман // Литейное производство. – 2008. – № 10. – С.29-34.

106. **Мартыненко С. В.** Сквозные технологии CAD/CAE/CAM в литейном производстве / С. В. Мартыненко, Е. В. Пигина, О. М. Огородникова // Инженерный журнал. – 2007. – № 2. – С. 25-28.
107. Ogorodnikova O. M. Combined analysis of technological processes and load conditions of casting / O. M. Ogorodnikova, **S. V. Martynenko** // Russian Metallurgy. – 2012. – № 9. – P. 754 – 756.
 Огородникова О. М. Связанный анализ технологических процессов и нагруженных состояний литой детали / О. М. Огородникова, **С. В. Мартыненко** // Металлы. – 2012. – № 5. – С. 19-21.
110. Огородникова О. М. Прогнозирование кристаллизационных трещин в LVMFlow // О. М. Огородникова, **С. В. Мартыненко**, В. М. Грузман / Компьютерный инженерный анализ : Материалы IV Российской научно-технической конференции, 16-17 октября 2007 г. – Челябинск, 2007. – С. 65-66.
111. Патент 119554 РФ. Экзотермический стержень трехгранный : № 2019504282 : заявл. 30.09.2019 : опубл. 24.04.2020 / Байков Х. Х., **Мартыненко С. В.**, Зверева Е. С., Рахметуллов Р. М., Лебедева Е. А.; заявитель и патентообладатель АО «НПК Уралвагонзавод». – Промышленные образцы. – Бюл. № 5. – 4 с.
112. Патент 119555 РФ. Экзотермический стержень пятигранный : № 2019504283 : заявл. 30.09.2019 : опубл. 24.04.2020 / Байков Х. Х., **Мартыненко С. В.**, Зверева Е. С., Рахметуллов Р. М., Лебедева Е. А.; заявитель и патентообладатель АО «НПК Уралвагонзавод». – Промышленные образцы. – Бюл. № 5. – 4 с.
113. Патент 119556 РФ. Экзотермический стержень четырехгранный : № 2019504284 : заявл. 30.09.2019 : опубл. 24.04.2020 / Байков Х. Х., **Мартыненко С. В.**, Зверева Е. С., Рахметуллов Р. М., Лебедева Е. А.; заявитель и патентообладатель АО «НПК Уралвагонзавод». – Промышленные образцы. – Бюл. № 5. – 4 с.
114. Патент 2764908 РФ. Способ отверждения жидкостекольной смеси при изготовлении форм и стержней: опубл. 24.01.2022 / Фирстов А.П., Лебедева Е.А., Мороз В.В., Пономарев С.Г., **Мартыненко С.В.**, Попова Т.А., Бочарникова Е.М.; заявитель и патентообладатель АО «НПК Уралвагонзавод». – Изобретения. Полезные модели. – Бюл. № 3. 2022. – 9 с.

115. Патент 2763105 РФ. Способ оценки извлекаемости стержневых и формовочных смесей: опубл. 27.12.2021 / Байков Х.Х., **Мартыненко С.В.**, Пономарев С.Г., Попова Т.А., Бочарникова Е.М.; заявитель и патентообладатель АО «НПК Уралвагонзавод». – Изобретения. Полезные модели. – Бюл. № 36. 2021. – 8 с.
116. Патент 2759368 РФ. Способ изготовления металлопластиковой оснастки и устройство для его осуществления: опубл. 12.11.2021 / Байков Х.Х., **Мартыненко С.В.**, Гурин Ю.А., Райкова О.В., Пузанков В.В.; заявитель и патентообладатель АО «НПК Уралвагонзавод». – Изобретения. Полезные модели. – Бюл. № 32. 2021. – 11 с.
117. Патент 2759369 РФ. Способ контроля времени заполнения литейных форм и устройство для его осуществления: опубл. 12.11.2021 / Пузанков В.В., **Мартыненко С.В.**, Лебедева Е.А., Байков Х.Х., Юрин С.Ю., Краснова М.С.; заявитель и патентообладатель АО «НПК Уралвагонзавод». – Изобретения. Полезные модели. – Бюл. № 32. 2021. – 17 с.
118. Патент 197083 РФ, МПК G01N 1/00 (2006.01). Проба для контроля трещиноустойчивости и жидкотекучести металла : № 2019140624 : заявл. 10.12.2019 : опубл. 30.03.2020 / **Мартыненко С. В.**, Байков Х. Х., Рахметуллов Р. М., Клюкина О. С., Филиппенков А. А.; заявитель и патентообладатель АО «НПК Уралвагонзавод». – Изобретения. Полезные модели. – Бюл. № 10. – 10 с.
119. **Мартыненко С. В.** Применение компьютерных технологий для повышения качества литых деталей вагонных тележек / С. В. Мартыненко, О. М. Огородникова, Х. Х. Байков // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 5. – С. 28-34.
120. Константинов Л. С. Рассредоточение усадочной деформации как метод предотвращения трещин в отливках / Л. С. Константинов, В. Д. Илюхин // Литейное производство. – 1975. – № 1. – С. 20-21.
121. Огородникова О. М. Компьютерное моделирование литой детали «Рама боковая» с учетом усадочной пористости / О. М. Огородникова, **С. В. Мартыненко**, И. М. Проничев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 2. – С. 36-40.

ПРИЛОЖЕНИЕ П1. РАСПЕЧАТКА РАБОЧЕГО ОКНА МАТЛАВ С ВЕРИФИКАЦИЕЙ РАСЧЕТНОЙ ЧАСТИ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

1 итерация*

```
>> prompt='Ввести моменты времени, сек [ ; ]:'; t=input(prompt)
[600; 1200; 2400]
>> prompt='Ввести экспериментальные температуры - 2 термопары [ ; ; ]:';
TE=input(prompt)
[967.021337; 190.078703; 732.078488; 245.288627; 464.015262; 242.695058]
>> prompt='Ввести стартовые значения температуры [ ; ; ]:'; TR0=input(prompt)
[945.212219; 175.074348; 696.284713; 230.901786; 415.292358; 221.474208]
>> % Вычислить разность экспериментальных и расчетных температур:
DT=TE-TR0
DT = 21.8091
    15.0044
    35.7938
    14.3868
    48.7229
    21.2208
>> % Вычислить коэффициент качества стартовой температурной кривой в %%
KK=100*sum(DT)/sum(TE)
KK = 5.5237
>> prompt='Ввести стартовые значения теплопроводности [ ; ; ]:';
SSconductivity=input(prompt)
[0.65; 0.65; 0.65]
>> prompt='Ввести стартовые значения теплоемкости [ ; ; ]:'; SScapacity=input(prompt)
[1000; 1000; 1000]
>> % Вычислить количество расчетных точек
>> Nconductivity=length(SSconductivity)
Nconductivity = 3
>> Ncapacity=length(SScapacity)
Ncapacity = 3
>> % Составить вектор свойств
>> SSconductivityK=1000*SSconductivity
>> SS=[SSconductivityK; SScapacity]
SS = 650
    650
    650
   1000
   1000
   1000
>> % Составить матрицу пробных температур
>> TR(:,1)=[949.564674; 175.802669; 701.975506; 235.386976; 425.059346; 227.203140]
>> TR(:,2)=[961.345486; 167.459748; 717.449641; 225.733240; 441.855032; 222.195193]
>> TR(:,3)=[998.128887; 160.367878; 705.384725; 228.229217; 419.315820; 221.490723]
>> TR(:,4)=[954.383472; 188.020491; 706.491276; 242.084615; 427.280302; 231.013904]
>> TR(:,5)=[951.921894; 182.444222; 700.643626; 235.527786; 416.285397; 222.700065]
>> TR(:,6)=[945.080281; 175.318039; 695.753848; 230.913045; 415.016164; 221.417385]
TR = 949.5647 961.3455 998.1289 954.3835 951.9219 945.0803
    175.8027 167.4597 160.3679 188.0205 182.4442 175.3180
```

```

701.9755 717.4496 705.3847 706.4913 700.6436 695.7538
235.3870 225.7332 228.2292 242.0846 235.5278 230.9130
425.0593 441.8550 419.3158 427.2803 416.2854 415.0162
227.2031 222.1952 221.4907 231.0139 222.7001 221.4174
>> % Вычислить отклонение пробных кривых от стартовой температурной кривой в %%
>> KTR(:,1)=100*sum(TR0-TR(:,1))/sum(TR0)
>> KTR(:,2)=100*sum(TR0-TR(:,2))/sum(TR0)
>> KTR(:,3)=100*sum(TR0-TR(:,3))/sum(TR0)
>> KTR(:,4)=100*sum(TR0-TR(:,4))/sum(TR0)
>> KTR(:,5)=100*sum(TR0-TR(:,5))/sum(TR0)
>> KTR(:,6)=100*sum(TR0-TR(:,6))/sum(TR0)
KTR = -1.1457 -1.9297 -1.8135 -2.4228 -0.9419 0.0276
>> % Составить матрицу Якоби
>> for i=1: 1: Nconductivity+Ncapacity
J(:,i)=(TR0-TR(:,i))/(0.1*SS(i))
end
J = -0.0670 -0.2482 -0.8141 -0.0917 -0.0671 0.0013
-0.0112 0.1171 0.2263 -0.1295 -0.0737 -0.0024
-0.0876 -0.3256 -0.1400 -0.1021 -0.0436 0.0053
-0.0690 0.0795 0.0411 -0.1118 -0.0463 -0.0001
-0.1503 -0.4087 -0.0619 -0.1199 -0.0099 0.0028
-0.0881 -0.0111 -0.0003 -0.0954 -0.0123 0.0006
>> % Проверить сингулярность
>> cond(J)
ans = 433.0182
>> cond(J'*J)
ans = 1.8750e+05
>> inv(J'*J)
ans = 1.0e+05 *
0.0444 -0.0005 -0.0028 -0.0524 0.0671 0.1887
-0.0005 0.0002 -0.0000 0.0003 -0.0003 0.0104
-0.0028 -0.0000 0.0002 0.0035 -0.0046 -0.0133
-0.0524 0.0003 0.0035 0.0631 -0.0816 -0.2265
0.0671 -0.0003 -0.0046 -0.0816 0.1070 0.2894
0.1887 0.0104 -0.0133 -0.2265 0.2894 1.9115
>> % Ввести коэффициент регуляризации
>> CoefReg=1/cond(J'*J)
CoefReg = 5.3332e-06
>> % Предложить изменение стартовых свойств
>> DS=inv(J'*J+CoefReg*eye(size(J'*J)))*J'*DT
>> % Вычислить изменение стартовых свойств в %%
>> DSprocent=diag(100*diag(DS)*inv(diag(SS)))
DSprocent = 6.7241
-9.0844
0.5312
-27.5863
18.7024
12.6941
>> % Нормировать изменение свойств на 20%
>> recomendDS=20*DSprocent/max(abs(DSprocent))
recomendDS = 4.8749
-6.5862

```

```

0.3851
-20.0000
13.5592
9.2032

```

```
>> % Вычислить значения свойств на следующую итерацию
```

```
>> SSreal=[SSconductivity; SScapacity]
```

```
>> SSnext=SSreal+0.01*diag(diag(SSreal)*diag(recomendDS))
```

```
>> SSnext =vpa(SSnext,4)
```

```

SSnext =    0.6817
          0.6072
          0.6525
          800.0
          1136.0
          1092.0

```

2 итерация

```
>> prompt='Ввести моменты времени, сек [ ; ; ]:'; t=input(prompt)
```

```
[600; 1200; 2400]
```

```
>> prompt='Ввести экспериментальные температуры - 3 термопары [ ; ; ]:';
```

```
TE=input(prompt)
```

```

[997.2054168; 344.8676234; 96.72880972; 744.3645413; 366.3203628; 160.0954831;
469.783398; 306.943101; 192.6047515]

```

```
>> prompt='Ввести стартовые значения температуры [ ; ; ]:'; TR0=input(prompt)
```

```

[995.4165873; 339.1152578; 90.25399156; 737.1074913; 363.7361829; 156.2315343;
459.6365285; 302.7022201; 188.0718534]

```

```
>> % Вычислить разность экспериментальных и расчетных температур:
```

```
DT=TE-TR0
```

```

DT =    1.7888
        5.7524
        6.4748
        7.2571
        2.5842
        3.8639
        10.1469
        4.2409
        4.5329

```

```
>> % Вычислить коэффициент качества стартовой температурной кривой в %%
```

```
KK=100*sum(DT)/sum(TE)
```

```
KK =    1.2678
```

```
>> prompt='Ввести стартовые значения теплопроводности [ ; ; ]:';
```

```
SSconductivity=input(prompt)
```

```
[0.682; 0.64; 0.607; 0.635; 0.653]
```

```
>> prompt='Ввести стартовые значения теплоемкости [ ; ; ]:'; SScapacity=input(prompt)
```

```
[800; 980; 1136; 1200]
```

```
>> % Вычислить количество расчетных точек
```

```
>> Nconductivity=length(SSconductivity)
```

```
Nconductivity =    5
```

```
>> Ncapacity=length(SScapacity)
```

```
Ncapacity =    4
```

```
>> % Составить вектор свойств
```

```
>> SSconductivityK=1000*SSconductivity
```

```
>> SS=[SSconductivityK; SScapacity]
```

```
SS =    682
```

```

640
607
635
653
800
980
1136
1200
>> % Составить матрицу пробных температур
>> TR(:,1)=[996.2850027; 340.2557512; 90.05726534; 738.146418; 365.0577008;
157.3461654; 461.3897914; 304.0975693; 189.0943295]
>> TR(:,2)=[997.4558781; 341.7548279; 88.29722327; 739.675932; 367.6059104;
154.8970102; 464.8574228; 307.3695574; 188.4540808]
>> TR(:,3)=[999.6583168; 335.7067355; 88.97678722; 742.8718511; 362.6077568;
154.2432305; 468.5518282; 303.0958381; 186.660135]
>> TR(:,4)=[1001.944018; 335.8865022; 89.50279654; 742.9230503; 361.5307832;
155.1386517; 462.7951437; 303.0659005; 187.6672171]
>> TR(:,5)=[1001.289492; 336.5885826; 89.49315784; 739.012291; 363.332431;
155.6434651; 460.531164; 302.9466618; 187.9778208]
>> TR(:,6)=[998.2136943; 343.1276289; 93.56918964; 739.9344187; 367.4744926;
159.9238045; 463.860008; 306.6570195; 192.1461645]
>> TR(:,7)=[999.4904083; 343.9648338; 92.08883941; 740.6295182; 367.3399446;
158.7764805; 462.8245981; 304.4158421; 190.0103865]
>> TR(:,8)=[998.4135467; 341.133923; 90.73592185; 738.3264539; 364.3985607;
156.7730396; 459.0270986; 302.3502059; 188.1412107]
>> TR(:,9)=[996.1951613; 339.5851186; 90.40543932; 736.8790509; 363.7037324;
156.314713; 459.4231448; 302.6140039; 188.0613814]
TR = 1.0e+03 *
0.9963 0.9975 0.9997 1.0019 1.0013 0.9982 0.9995 0.9984 0.9962
0.3403 0.3418 0.3357 0.3359 0.3366 0.3431 0.3440 0.3411 0.3396
0.0901 0.0883 0.0890 0.0895 0.0895 0.0936 0.0921 0.0907 0.0904
0.7381 0.7397 0.7429 0.7429 0.7390 0.7399 0.7406 0.7383 0.7369
0.3651 0.3676 0.3626 0.3615 0.3633 0.3675 0.3673 0.3644 0.3637
0.1573 0.1549 0.1542 0.1551 0.1556 0.1599 0.1588 0.1568 0.1563
0.4614 0.4649 0.4686 0.4628 0.4605 0.4639 0.4628 0.4590 0.4594
0.3041 0.3074 0.3031 0.3031 0.3029 0.3067 0.3044 0.3024 0.3026
0.1891 0.1885 0.1867 0.1877 0.1880 0.1921 0.1900 0.1881 0.1881
>> % Вычислить отклонение пробных кривых от стартовой температурной кривой в %%
>> KTR(:,1)=100*sum(TR0-TR(:,1))/sum(TR0)
>> KTR(:,2)=100*sum(TR0-TR(:,2))/sum(TR0)
>> KTR(:,3)=100*sum(TR0-TR(:,3))/sum(TR0)
>> KTR(:,4)=100*sum(TR0-TR(:,4))/sum(TR0)
>> KTR(:,5)=100*sum(TR0-TR(:,5))/sum(TR0)
>> KTR(:,6)=100*sum(TR0-TR(:,6))/sum(TR0)
>> KTR(:,7)=100*sum(TR0-TR(:,7))/sum(TR0)
>> KTR(:,8)=100*sum(TR0-TR(:,8))/sum(TR0)
>> KTR(:,9)=100*sum(TR0-TR(:,9))/sum(TR0)
KTR = -0.2604 -0.4982 -0.2781 -0.2253 -0.1251 -0.8985 -0.7507 -0.1935 -0.0251
>> % Составить матрицу Якоби
>> for i=1:1:Nconductivity+Ncapacity
J(:,i)=(TR0-TR(:,i))/(0.05*SS(i))
end

```

```

J =   -0.0255 -0.0637 -0.1398 -0.2056 -0.1799 -0.0699 -0.0831 -0.0528 -0.0130
      -0.0334 -0.0825  0.1123  0.1017  0.0774 -0.1003 -0.0990 -0.0355 -0.0078
      0.0058  0.0611  0.0421  0.0237  0.0233 -0.0829 -0.0374 -0.0085 -0.0025
      -0.0305 -0.0803 -0.1899 -0.1832 -0.0583 -0.0707 -0.0719 -0.0215  0.0038
      -0.0388 -0.1209  0.0372  0.0695  0.0124 -0.0935 -0.0735 -0.0117  0.0005
      -0.0327  0.0417  0.0655  0.0344  0.0180 -0.0923 -0.0519 -0.0095 -0.0014
      -0.0514 -0.1632 -0.2937 -0.0995 -0.0274 -0.1056 -0.0651  0.0107  0.0036
      -0.0409 -0.1459 -0.0130 -0.0115 -0.0075 -0.0989 -0.0350  0.0062  0.0015
      -0.0300 -0.0119  0.0465  0.0127  0.0029 -0.1019 -0.0396 -0.0012  0.0002

>> % Проверить сингулярность
>> cond(J)
ans = 3.1000e+03
>> cond(J'*J)
ans = 9.6099e+06
>> inv(J'*J)
ans = 1.0e+07 *
      0.0193 -0.0001  0.0148 -0.0183 -0.0011  0.0292 -0.0831  0.1565 -0.1523
      -0.0001  0.0000 -0.0001  0.0001  0.0000 -0.0002  0.0004 -0.0009  0.0008
      0.0148 -0.0001  0.0114 -0.0141 -0.0009  0.0226 -0.0641  0.1208 -0.1177
      -0.0183  0.0001 -0.0141  0.0175  0.0011 -0.0280  0.0794 -0.1497  0.1460
      -0.0011  0.0000 -0.0009  0.0011  0.0001 -0.0017  0.0049 -0.0092  0.0088
      0.0292 -0.0002  0.0226 -0.0280 -0.0017  0.0448 -0.1270  0.2394 -0.2332
      -0.0831  0.0004 -0.0641  0.0794  0.0049 -0.1270  0.3605 -0.6794  0.6618
      0.1565 -0.0009  0.1208 -0.1497 -0.0092  0.2394 -0.6794  1.2805 -1.2478
      -0.1523  0.0008 -0.1177  0.1460  0.0088 -0.2332  0.6618 -1.2478  1.2179

>> % Ввести коэффициент регуляризации
>> CoefReg=1/cond(J'*J)
CoefReg = 1.0406e-07
>> % Предложить изменение стартовых свойств
>> DS=inv(J'*J+CoefReg*eye(size(J'*J)))*J'*DT
>> % Вычислить изменение стартовых свойств в %%%
>> DSprocent=diag(100*diag(DS)*inv(diag(SS)))
DSprocent =  5.8791
              0.3664
             -5.0696
             -1.2074
              8.7169
             -11.6564
              6.6866
             -11.1808
              2.9108

>> % Нормировать изменение свойств на 5%
>> recomendDS=5*DSprocent/max(abs(DSprocent))
recomendDS =  2.5218
              0.1572
             -2.1746
             -0.5179
              3.7391
             -5.0000
              2.8682
             -4.7960
              1.2486

```

```
>> % Вычислить значения свойств на следующую итерацию
>> SSreal=[SSconductivity; SScapacity]
>> SSnext=SSreal+0.01*diag(diag(SSreal)*diag(recomendDS))
>> SSnext =vpa(SSnext,4)
SSnext =    0.6992
          0.641
          0.5938
          0.6317
          0.6774
          760.0
          1008.0
          1082.0
          1215.0
```

3 итерация

```
prompt='Ввести моменты времени, сек [ ; ]: '; t=input(prompt)
[600; 1200; 1800; 2400]
>> prompt='Ввести экспериментальные температуры - 2 термопары [ ; ; ]: ';
TE=input(prompt)
[997.2054168;344.8676234; 96.72880972; 744.3645413; 366.3203628; 160.0954831;
588.1177024; 340.2881088; 184.3256864; 469.783398; 306.943101; 192.6047515]
>> prompt='Ввести стартовые значения температуры [ ; ; ]: '; TR0=input(prompt)
[993.9003814;336.6559985; 90.08005724; 737.3002116; 360.3530242; 154.1079988;
578.1020362; 334.731886; 178.355957; 459.5355234; 300.5465865; 186.1052116]
>> % Вычислить разность экспериментальных и расчетных температур:
```

```
DT=TE-TR0
DT =    3.3050
        8.2116
        6.6488
        7.0643
        5.9673
        5.9875
        10.0157
        5.5562
        5.9697
        10.2479
        6.3965
        6.4995
```

```
>> % Вычислить коэффициент качества стартовой температурной кривой в %%
```

```
KK=100*sum(DT)/sum(TE)
```

```
KK =    1.7086
```

```
>> prompt='Ввести стартовые значения теплопроводности [ ; ; ]: ';
```

```
SSconductivity=input(prompt)
```

```
[0.699; 0.641; 0.594; 0.61; 0.632; 0.677]
```

```
>> prompt='Ввести стартовые значения теплоемкости [ ; ; ]: '; SScapacity=input(prompt)
```

```
[760; 900; 1008; 1082; 1140]
```

```
>> % Вычислить количество расчетных точек
```

```
>> Nconductivity=length(SSconductivity)
```

```
Nconductivity =    6
```

```
>> Ncapacity=length(SScapacity)
```

```
Ncapacity =    5
```



```

>> % Составить вектор свойств
>> SSconductivityK=1000*SSconductivity
>> SS=[SSconductivityK; SScapacity]
SS = 699
    641
    594
    610
    632
    677
    760
    900
   1008
   1082
   1140
>> % Составить матрицу пробных температур
TR(:,1)=[994.1989535; 337.1159277; 89.99903618; 737.6476057; 360.8704258; 154.5261696;
578.5926658; 335.264733; 178.8072684; 460.1072511; 301.0594568; 186.4947318]
TR(:,2)=[994.6519613; 337.6962739; 89.32316853; 738.2558364; 361.8866645; 153.5670984;
579.5957784; 336.4619409; 178.2214104; 461.5034332; 302.3262334; 186.2037507]
TR(:,3)=[994.9087896; 335.8455898; 89.71176149; 738.6669669; 360.3009996; 153.5266359;
580.3777906; 334.7595988; 177.7969442; 462.3359157; 300.6542833; 185.6614745]
TR(:,4)=[995.2336939; 335.6270966; 89.85266525; 739.1969287; 359.5320008; 153.7625049;
580.2162234; 334.308534; 178.0241156; 460.9361684; 300.5954689; 185.9051497]
TR(:,5)=[995.6723513; 335.898751; 89.90836994; 738.5833215; 359.9099998; 153.867383;
578.8764469; 334.7199779; 178.2043437; 460.0572519; 300.6615804; 186.0496448]
TR(:,6)=[995.8961937; 335.6889478; 89.79311641; 737.9629988; 360.1900043; 153.8828849;
578.5847772; 334.7737432; 178.2536637; 459.8920365; 300.6331802; 186.0646046]
TR(:,7)=[994.3480922; 337.3183694; 90.78087805; 737.7538039; 361.005024; 154.8169302;
578.706875; 335.4187653; 179.1250508; 460.2512959; 301.3022056; 186.9283576]
TR(:,8)=[994.9288332; 338.1948558; 90.97945847; 738.3232877; 361.7028551; 155.272018;
579.3833221; 335.9772302; 179.5110063; 460.9242322; 301.7661553; 187.2863843]
TR(:,9)=[995.0053472; 338.0601644; 90.45503188; 738.2398843; 361.2931881; 154.6698953;
579.0299764; 335.2667437; 178.8204315; 460.1576019; 300.7420435; 186.4270058]
TR(:,10)=[994.7353697; 337.3066976; 90.22714592; 737.7397796; 360.5912982; 154.2828273;
578.1626614; 334.6988192; 178.448424; 459.3181523; 300.4246238; 186.1289601]
TR(:,11)=[994.3958536; 336.9109723; 90.14486223; 737.2646102; 360.359626; 154.1580954;
577.9740849; 334.6913537; 178.3687331; 459.4394034; 300.5101606; 186.1047559]
TR = 1.0e+03 *
994.1990 994.6520 994.9088 995.2337 995.6724 995.8962 994.3481 994.9288 995.0053 994.7354 994.3959
337.1159 337.6963 335.8456 335.6271 335.8988 335.6889 337.3184 338.1949 338.0602 337.3067 336.9110
89.9990 89.3232 89.7118 89.8527 89.9084 89.7931 90.7809 90.9795 90.4550 90.2271 90.1449
737.6476 738.2558 738.6670 739.1969 738.5833 737.9630 737.7538 738.3233 738.2399 737.7398 737.2646
360.8704 361.8867 360.3010 359.5320 359.9100 360.1900 361.0050 361.7029 361.2932 360.5913 360.3596
154.5262 153.5671 153.5266 153.7625 153.8674 153.8829 154.8169 155.2720 154.6699 154.2828 154.1581
578.5927 579.5958 580.3778 580.2162 578.8764 578.5848 578.7069 579.3833 579.0300 578.1627 577.9741
335.2647 336.4619 334.7596 334.3085 334.7200 334.7737 335.4188 335.9772 335.2667 334.6988 334.6914
178.8073 178.2214 177.7969 178.0241 178.2043 178.2537 179.1251 179.5110 178.8204 178.4484 178.3687
460.1073 461.5034 462.3359 460.9362 460.0573 459.8920 460.2513 460.9242 460.1576 459.3182 459.4394
301.0595 302.3262 300.6543 300.5955 300.6616 300.6332 301.3022 301.7662 300.7420 300.4246 300.5102
186.4947 186.2038 185.6615 185.9051 186.0496 186.0646 186.9284 187.2864 186.4270 186.1290 186.1048
>> % Вычислить отклонение пробных кривых от стартовой температурной кривой в %%
>> KTR(:,1)=100*sum(TR0-TR(:,1))/sum(TR0)
>> KTR(:,2)=100*sum(TR0-TR(:,2))/sum(TR0)
>> KTR(:,3)=100*sum(TR0-TR(:,3))/sum(TR0)

```

```

>> KTR(:,4)=100*sum(TR0-TR(:,4))/sum(TR0)
>> KTR(:,5)=100*sum(TR0-TR(:,5))/sum(TR0)
>> KTR(:,6)=100*sum(TR0-TR(:,6))/sum(TR0)
>> KTR(:,7)=100*sum(TR0-TR(:,7))/sum(TR0)
>> KTR(:,8)=100*sum(TR0-TR(:,8))/sum(TR0)
>> KTR(:,9)=100*sum(TR0-TR(:,9))/sum(TR0)
>> KTR(:,10)=100*sum(TR0-TR(:,10))/sum(TR0)
>> KTR(:,11)=100*sum(TR0-TR(:,11))/sum(TR0)
KTR = -0.1042 -0.2106 -0.1013 -0.0725 -0.0559 -0.0391 -0.1695 -0.3073 -0.1782 -
0.0486 -0.0116
>> % Составить матрицу Якоби
>> for i=1: 1: Nconductivity+Ncapacity
J(:,i)=(TR0-TR(:,i))/(0.05*SS(i))
end
J =
-0.0085 -0.0235 -0.0340 -0.0437 -0.0561 -0.0590 -0.0118 -0.0229 -0.0219 -0.0154 -0.0087
-0.0132 -0.0325 0.0273 0.0337 0.0240 0.0286 -0.0174 -0.0342 -0.0279 -0.0120 -0.0045
0.0023 0.0236 0.0124 0.0075 0.0054 0.0085 -0.0184 -0.0200 -0.0074 -0.0027 -0.0011
-0.0099 -0.0298 -0.0460 -0.0622 -0.0406 -0.0196 -0.0119 -0.0227 -0.0186 -0.0081 0.0006
-0.0148 -0.0479 0.0018 0.0269 0.0140 0.0048 -0.0172 -0.0300 -0.0187 -0.0044 -0.0001
-0.0120 0.0169 0.0196 0.0113 0.0076 0.0067 -0.0187 -0.0259 -0.0111 -0.0032 -0.0009
-0.0140 -0.0466 -0.0766 -0.0693 -0.0245 -0.0143 -0.0159 -0.0285 -0.0184 -0.0011 0.0022
-0.0152 -0.0540 -0.0009 0.0139 0.0004 -0.0012 -0.0181 -0.0277 -0.0106 0.0006 0.0007
-0.0129 0.0042 0.0188 0.0109 0.0048 0.0030 -0.0202 -0.0257 -0.0092 -0.0017 -0.0002
-0.0164 -0.0614 -0.0943 -0.0459 -0.0165 -0.0105 -0.0188 -0.0309 -0.0123 0.0040 0.0017
-0.0147 -0.0555 -0.0036 -0.0016 -0.0036 -0.0026 -0.0199 -0.0271 -0.0039 0.0023 0.0006
-0.0111 -0.0031 0.0149 0.0066 0.0018 0.0012 -0.0217 -0.0262 -0.0064 -0.0004 0.0000
>> % Проверить сингулярность
>> cond(J)
ans = 306.0480
>> cond(J'*J)
ans = 9.3665e+04
>> inv(J'*J)
ans = 1.0e+05 *
0.7249 0.0767 0.0999 -0.0228 -0.0129 -0.1385 2.1678 -2.1654 0.4921 0.6226 0.2324
0.0767 0.0192 0.0073 0.0075 -0.0180 -0.0101 0.3426 -0.3323 0.0871 0.0785 0.0422
0.0999 0.0073 0.0394 -0.0189 -0.0155 -0.0161 0.2714 -0.2355 -0.0747 0.3283 -0.1129
-0.0228 0.0075 -0.0189 0.0408 -0.0641 0.0340 -0.0301 0.0369 -0.0181 -0.0051 0.0551
-0.0129 -0.0180 -0.0155 -0.0641 0.2121 -0.1070 -0.0740 -0.0125 0.2813 -0.5726 0.2358
-0.1385 -0.0101 -0.0161 0.0340 -0.1070 0.0984 -0.4227 0.4529 -0.2101 0.1186 -0.2036
2.1678 0.3426 0.2714 -0.0301 -0.0740 -0.4227 8.2565 -8.1759 2.4209 1.4444 1.0149
-2.1654 -0.3323 -0.2355 0.0369 -0.0125 0.4529 -8.1759 8.1934 -2.7023 -0.9076 -1.2653
0.4921 0.0871 -0.0747 -0.0181 0.2813 -0.2101 2.4209 -2.7023 1.9804 -1.7820 1.2783
0.6226 0.0785 0.3283 -0.0051 -0.5726 0.1186 1.4444 -0.9076 -1.7820 4.2669 -1.8704
0.2324 0.0422 -0.1129 0.0551 0.2358 -0.2036 1.0149 -1.2653 1.2783 -1.8704 1.8139
>> % Ввести коэффициент регуляризации
>> CoefReg=1/cond(J'*J)
CoefReg = 1.0676e-05
>> % Предложить изменение стартовых свойств
>> DS=inv(J'*J+CoefReg*eye(size(J'*J)))*J'*DT
>> % Вычислить изменение стартовых свойств в %%
>> DSprocent=diag(100*diag(DS)*inv(diag(SS)))
DSprocent = 9.5301
0.1384
-3.9562
-7.9910
2.8567

```

```

10.6874
-21.9356
-16.9003
-1.8427
-0.6776
-2.7006
>> % Нормировать изменение свойств на 5%
>> recomendDS=5*DSprocent/max(abs(DSprocent))
recomendDS =    2.1723
              0.0316
             -0.9018
             -1.8215
              0.6512
              2.4361
             -5.0000
             -3.8523
             -0.4200
             -0.1544
             -0.6156
>> % Вычислить значения свойств на следующую итерацию
>> SSreal=[SSconductivity; SScapacity]
>> SSnext=SSreal+0.01*diag(diag(SSreal)*diag(recomendDS))
>> SSnext =vpa(SSnext,4)
SSnext =    0.7142
           0.6412
           0.5886
           0.5989
           0.6361
           0.6935
           722.0
           865.3
           1004.0
           1080.0
           1133.0

```

* Распечатка демонстрирует алгоритм поиска теплофизических свойств песчаной смеси, но не представляет полный программный код.

ПРИЛОЖЕНИЕ П2. ИНТЕРФЕЙСНЫЕ ОКНА РАЗРАБОТАННОЙ ПРОГРАММЫ

1. Теплопроводность
2. Теплоемкость
3. Плотность
4. Экспериментальные температуры
5. Настройки
6. Оптимизировать значения

Шаг 1. Введите значения теплопроводности, Вт/(м²К).

Добавить Удалить

1	0.7000
2	0.5970
3	0.5440
4	0.5200
5	0.5310
6	0.5800
7	0.6930
8	0.9000
9	1.1180
10	1.3250
11	1.4840
12	1.6500
13	1.7800
14	1.9200
15	1.9900

1. Теплопроводность
2. Теплоемкость
3. Плотность
4. Экспериментальные температуры
5. Настройки
6. Оптимизировать значения

Шаг 4. Введите экспериментальные значения температуры, °C.

Добавить Удалить

	Время, с
1	1575
2	1730

Экспериментальные данные

От 100 до 3000 сек

☐ Диапазон ☒ Таблица

1. Теплопроводность
2. Теплоемкость
3. Плотность
4. Экспериментальные температуры
5. Настройки
6. Оптимизировать значения

Шаг 6. Оптимизация свойств методом Левенберга-Марквардта.

Оптимизировать Первая термopapa

Сохранить как Вторая термopapa Исходный критерий качества: 2.16%

Конечное m: 0.78125

Оптимизированные значения:

	Параметр	Начальное	Итоговое	Тенденция %
1	Теплопроводность 1	0.70000	0.75125	8
2	Теплопроводность 2	0.59700	0.63247	6
3	Теплопроводность 3	0.54400	0.62136	15
4	Теплопроводность 4	0.52000	0.53670	4
5	Теплопроводность 5	0.53100	0.52729	0
6	Теплопроводность 6	0.58000	0.56315	-2
7	Теплопроводность 7	0.69300	0.67400	-2
8	Теплопроводность 8	0.90000	0.93875	5
9	Теплопроводность 9	1.1180	1.2528	13
10	Теплопроводность 10	1.3250	1.4492	10
11	Теплопроводность 11	1.4840	1.5325	4
12	Теплопроводность 12	1.6500	1.7223	5
13	Теплопроводность 13	1.7800	2.0436	15

ПРИЛОЖЕНИЕ ПЗ. АКТ ВНЕДРЕНИЯ

	УРАЛВАГОНЗАВОД	1936	
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ «УРАЛВАГОНЗАВОД» ИМЕНИ Ф.Э. ДЗЕРЖИНСКОГО»			
Восточное шоссе, 28, г. Нижний Тагил, Свердловская область, 622007, телетайп 199441 "КЛРН", телефон (3435) 344-209 - справочное бюро телефон/факс: (3435) 345-018, e-mail: web@ark.uvz.ru, www.uvz.ru ОКПО 07518941, ОГРН 1086623802190, ИНН/КПП 6623029538/997450001			

04.04.2022 № 500-13/0042

На _____ от _____

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

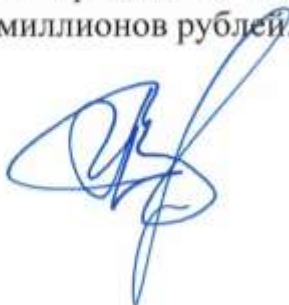
Настоящим актом подтверждается, что в проектно-производственные процессы АО «НПК «Уралвагонзавод» внедрены результаты диссертационного исследования на тему «Совершенствование технологии изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок с применением уточненной по свойствам материалов компьютерной модели», выполненного заместителем главного металлурга Мартыненко Сергеем Витальевичем. Практическую значимость имеют следующие внедренные результаты:

1. Разработанный расчетно-экспериментальный метод корректировки теплофизических свойств материалов песчаных форм и стержней используется в конструкторском бюро литейной оснастки. С помощью данного метода удалось создать базу данных материалов формовочных и стержневых смесей для системы автоматизированного проектирования технологических процессов литья LVMFlow, соответствующих по свойствам смесям, используемым в действующем производстве.

2. Уточненная по свойствам материалов компьютерная модель процессов литья в песчаные формы применяется в отделе главного металлурга для достоверного анализа и оперативного изменения технологий изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок в программной среде LVMFlow.

3. Усовершенствованные с применением уточненного компьютерного моделирования технологии изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная» реализованы в цехе крупного стального литья АО «НПК «Уралвагонзавод». Внедрение усовершенствованных технологий привело к снижению брака на 12% с экономическим эффектом 161.35 миллионов рублей.

Главный инженер



П. В. Слободяник

Райкова О.В.
тел. 8(3435)344-931