

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена на кафедре «Литейное производство и упрочняющие технологии» Института новых материалов и технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Огородникова Ольга Михайловна

Официальные оппоненты: **Коротченко Андрей Юрьевич**,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана (национальный
исследовательский университет)», г. Москва,
заведующий кафедрой «Литейные технологии»;

Кулаков Борис Алексеевич,
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»,
г. Челябинск, профессор кафедры
«Пирометаллургические и литейные технологии»;

Монастырский Алексей Валерьевич,
кандидат технических наук, АО «СиСофт»,
г. Москва, заместитель руководителя отдела
машиностроения.

Защита состоится «17» июня 2022 г. в 15:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.6.03.08 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=3532>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Шопперт Андрей Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 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 программного обеспечения 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, Л. Я. Козлов, В. В. Назаратин, Ю. А. Нехендзи 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 настроенной компьютерной модели провести вычислительные эксперименты и изучить условия образования усадочных дефектов в крупногабаритных тонкостенных стальных отливках «Рама боковая» и «Балка надрессорная».

4. С учетом результатов компьютерного моделирования усовершенствовать и апробировать в условиях производства АО «Научно-производственная корпорация «Уралвагонзавод» (УВЗ), г. Нижний Тагил, 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 тонкостенной 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 °С, 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 разработанных технологий в цехе крупного стального литья УВЗ 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 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 термомпарами 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 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. 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. 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 надрессорная», 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.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы представлены в 27 научных работах, из них 6 статей, опубликованных в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 3 статьи проиндексированы в международных базах Scopus и Web of Science; 9 патентов РФ на изобретения.

Запатентованные компоненты технологической оснастки используются в условиях УВЗ при производстве крупногабаритных тонкостенных стальных отливок.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложений. Общий объем работы составляет 160 страниц, в том числе 106 рисунков, 3 приложения. Список цитированной литературы содержит 121 источник.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены ее цель и решаемые задачи, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены сведения об апробации и внедрении результатов работы, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ проблематики обеспечения качества крупногабаритных тонкостенных стальных отливок железнодорожного подвижного состава, компьютерного моделирования технологий литья в песчаные формы и обеспечения САПР технологии изготовления литых заготовок базами данных материалов. К классу крупногабаритных тонкостенных отливок относятся отливки «Рама боковая» и «Балка надрессорная», вес которых достигает нескольких сотен килограммов, толщина стенок составляет 15-20 мм при габаритных размерах более 2 метров. Особое внимание уделено проблемам наличия литейных дефектов в указанных отливках, влияющих на их эксплуатационную надежность. Проблематика совершенствования технологий литья с целью обеспечения повышенного качества крупногабаритных тонкостенных стальных отливок определяется прежде всего такими нетехнологичными конструктивными особенностями, как закрытые тепловые узлы, массивные приливы, резкие переходы от тонких сечений в стенках к массивным узлам, наличие коробчатых сечений.

Для совершенствования технологий литья в настоящее время активно используются методы компьютерного моделирования и САПР литейной оснастки и технологии. В научных статьях последнего периода приводятся результаты исследования литейных процессов с использованием зарубежных программ ProCast, Magma, WinCast, SolidCast. Успешно используются технологами отечественные программы, соизмеримые по точности прогнозирования с зарубежными аналогами, – Полигон, LVMFlow.

Анализ работ, посвященных компьютерному моделированию литейных технологий, позволяет сделать вывод о том, что для всех коммерческих САПР общей является проблема комплектации базы данных материалов. Отсутствие в базе данных требуемых сплавов или материалов формы (формовочных и стержневых смесей, холодильников, экзотермических или изотермических вставок и других элементов технологической оснастки) приводит к неэффективному использованию программы или некорректным результатам моделирования.

Неопределенность в назначении свойств формовочных материалов продемонстрирована на примере холодно-твердеющей смеси (ХТС) 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 1.

Теплофизические свойства литейных сталей и сплавов в температурном интервале кристаллизации можно моделировать, исходя из химического и фазового состава, с использованием, например, программы Java-based Materials Properties (JMatPro). Что касается формовочных материалов, они часто изготавливаются по техническим условиям предприятия, относятся к нестандартизованным материалам и имеют уникальный состав. Для таких материалов необходима корректировка теплофизических характеристик с учетом условий производства.

Таблица 1 – Свойства смеси ХТС по Furan-процессу в разных САПР

Температура, °С	LVMFlow			SolidCast			WinCast		ProCast		
	λ^*	C^*	ρ^*	λ	C	ρ	λ	ρ	λ	C	ρ
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					

* λ – теплопроводность (Вт/(м×К)); C – теплоемкость (Дж/(К×м³)); ρ – плотность (кг/ м³).

Вследствие влияния ряда факторов свойства формовочных материалов для различных литейных производств индивидуальны. Так, теплопроводность смесей зависит от степени уплотнения. К проблематике комплектации свойств материалов песчаных форм и стержней для использования в САПР относится также эффект быстрого их изменения после приготовления. В связи с этим свойства смеси, 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. 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, исключая образование недопустимых дефектов.

Во второй главе описаны материалы и методики исследования, приведено обоснование выбора САПР литейной технологии LVMFlow, рассмотрены свойства литейной стали 20ГЛ для изготовления крупногабаритных тонкостенных отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная».

В данной работе предпочтение было отдано использованию отечественной программы LVMFlow с целью, в частности, ее усиления и развития, адаптации к моделированию сложных отливок и технологий, что обеспечивает дополнительные позиции в практической и научной значимости выполненной диссертационной работы. Программа LVMFlow дает возможность повышать точность компьютерных моделей за счет корректировки теплофизических характеристик материалов: теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности, как расплава, так и формы. В данной работе внимание акцентировано на свойствах формовочных материалов, поскольку использованные в компьютерном моделировании свойства литейной стали подробно изучены.

В литейном цехе крупного стального литья УВЗ для изготовления крупногабаритных стальных отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная» применяется сталь 20ГЛ по ГОСТ 32400-2013. Для проверки достоверности использованных свойств стали 20Л проведено сравнение имеющихся в базе LVMFlow свойств с аналогичными температурными зависимостями, вычисленными средствами программы JMatPro по химическому составу (рисунок 1).

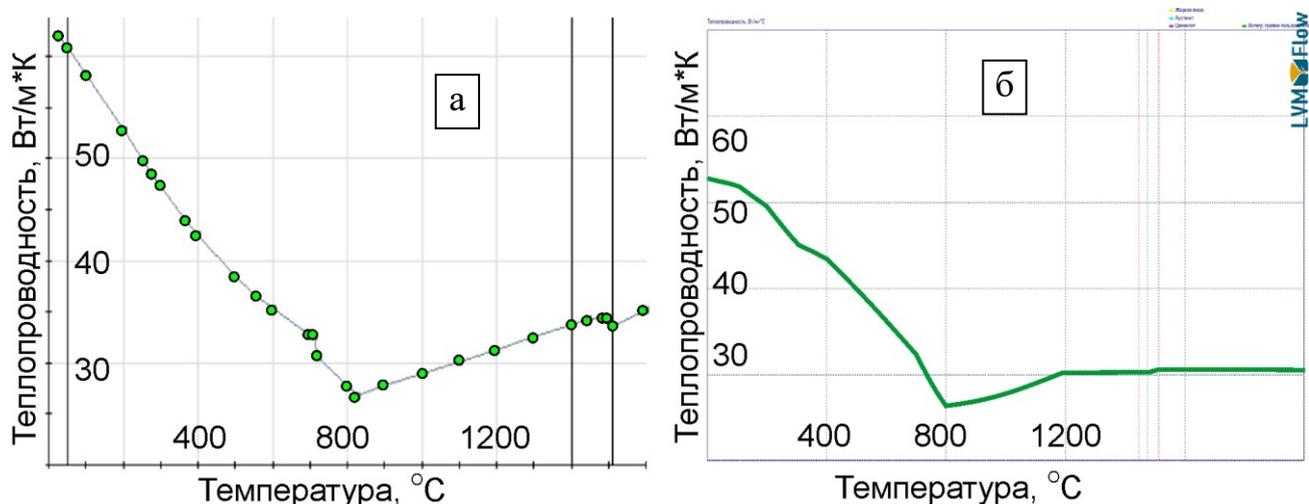


Рисунок 1 – Зависимость теплопроводности стали 20Л от температуры в программах JMatPro (а) и LVMFlow (б)

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 °C составляет 0.054, в интервале 400–1200 °C – 0.067, в интервале 1200–1600 °C – 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, доказывает возможность использования данных о стали 20Л из базы LVMFlow для компьютерного моделирования отливок из стали 20ГЛ с незначительными корректировками.

В рамках данного диссертационного исследования измерены теплофизические свойства формовочных материалов по стандартным методикам: удельной теплоемкости – методом дифференциальной сканирующей калориметрии, коэффициента температуропроводности – методом лазерной вспышки, температурного коэффициента линейного расширения – методом дилатометрии. Пробные расчеты показали, что измеренные характеристики оказались непригодными для использования в качестве входных данных для компьютерного моделирования процессов затвердевания крупногабаритных стальных отливок, поскольку получены при нагреве от комнатной температуры до 300 °С (удельная теплоемкость – до 900 °С) на маленьких цилиндрических 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.

Третья глава посвящена разработке расчетно-экспериментального метода для уточнения теплопроводности и удельной теплоемкости формовочных материалов как входных данных для компьютерного моделирования в САПР технологий изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок способом литья в песчаные формы. Рассмотрены основные виды формовочных смесей, применяемых в литейном производстве УВЗ, их технологические свойства и состав. Описана экспериментальная часть разработанного метода по регистрации термодатчиками температурных кривых охлаждения в процессе затвердевания отливки в песчаной форме, а также математическое и программное обеспечение расчетной части метода.

Экспериментальная часть разработанного метода предполагает два варианта регистрации температурных полей – при затвердевании в песчаной форме тестового образца или крупногабаритной отливки.

Натурный эксперимент по затвердеванию тестовой цилиндрической отливки из стали 20ГЛ проведен в заводской лаборатории УВЗ (рисунок 2 а). Цилиндрическая геометрия отливки позволяет приблизить решаемую задачу теплопроводности к осесимметричной постановке. Для измерения температуры использовано 6 термопар, расположенных на разном удалении от оси симметрии. При проведении идентичного вычислительного эксперимента в программе LVMFlow в геометрическую модель (рисунок 2 б) введены

термопары, сборка которых включает платино-родиевые проволоки, погруженные в изолятор (фарфор), защищенные трубкой и кожухом (кварцевое стекло).



Рисунок 2 – Натурный эксперимент (а) и компьютерная модель (б) цилиндрической тестовой отливки в песчаной форме с 6 термопарами

Натурный эксперимент по затвердеванию крупногабаритной тонкостенной отливки из стали 20ГЛ в песчаной форме с установкой 16 термопар проведен в цеховых условиях УВЗ (рисунок 3 а).

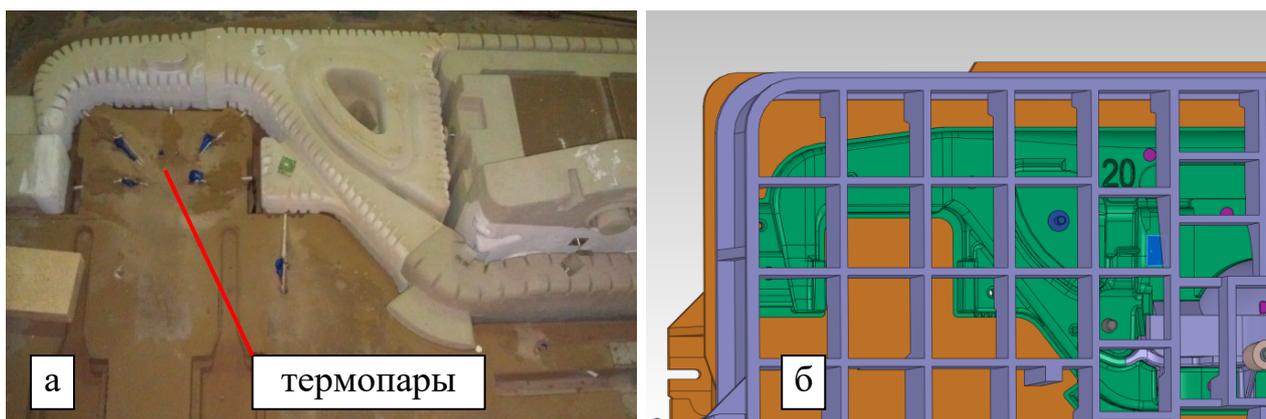


Рисунок 3 – Натурный эксперимент (а) и компьютерная модель (б) отливки «Рама боковая» в песчаной форме с 16 термопарами

Расчетная часть разработанного метода предполагает два этапа расчетов: 1) решение прямой задачи теплопроводности в программе LVMFlow для регистрации расчетного температурного поля и 2) решение обратной задачи с применением авторской программы для восстановления теплофизических свойств материалов путем приближения расчетного температурного поля к экспериментальному. В программе LVMFlow выполняется компьютерное моделирование аналогичных эксперименту технологий с назначением сенсоров температуры в пространственных точках модели, соответствующих расположению термопар. Полученные температурные кривые от реальных термопар и виртуальных сенсоров температуры (рисунок 4) позволяют проверить компьютерную модель технологического процесса и уточнить свойства материалов формы с учетом цеховых условий изготовления формы, стержней и отливки.

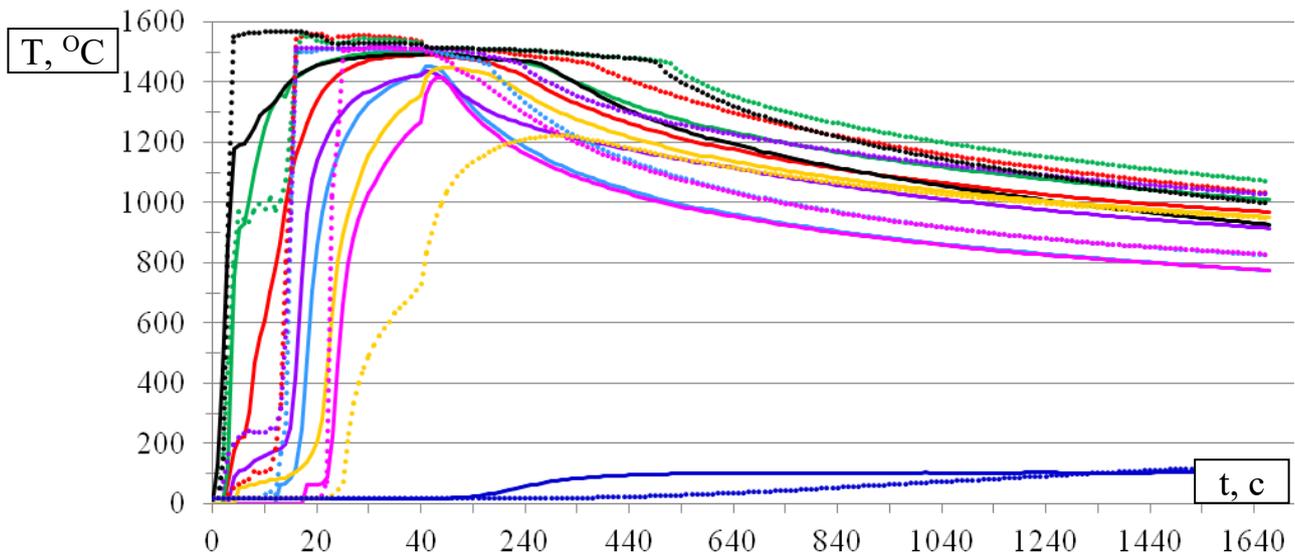


Рисунок 4 – Температурные кривые при затвердевании отливки «Рама боковая» в песчаной форме: экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (пунктирные линии)

Математическое обеспечение расчетной части разработанного метода основано на алгоритме многопараметрической оптимизации Левенберга-Марквардта. Алгоритм эффективно используется в технологиях искусственного интеллекта для быстрого обучения нейронных сетей на больших данных. В соответствии с алгоритмом производится последовательное приближение заданных начальных значений параметров (значений теплофизических свойств) к оптимальным значениям, удовлетворяющим критерию качества. Стартовыми значениями теплофизических свойств при решении обратной задачи с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта могут служить свойства 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 %.

Алгоритм итерационного решения построен таким образом, что уточненные значения искомым теплофизических свойств \mathbf{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 вектором значений свойств на предыдущем шаге \mathbf{S}^{k-1} :

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

где матрица Якоби $\mathbf{J} = \frac{\partial T_i}{\partial S_j}$ составляется в серии пробных экспериментов,

фиксирующих изменение расчетной температуры $T(x, y, z, t)$ при последовательном единичном возмущении всех рассматриваемых точек; \mathbf{I} – единичная матрица; коэффициент регуляризации μ обеспечивает получение хорошо обусловленной обратной матрицы $(\mathbf{J}^T \times \mathbf{J} + \mu \times \mathbf{I})^{-1}$.

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.

Верификация расчетной части метода выполнена в вычислительном эксперименте на свойствах песчаной смеси с содержанием глины огнеупорной 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 назначены экспериментальными. Далее в базе данных материалов создан новый материал, которому назначены температурные зависимости теплопроводности и теплоемкости, которые состоят из 3 точек с одинаковыми значениями свойства: 0.65 Вт/м×К для теплопроводности и 1000 Дж/кг×К для теплоемкости. Приближение теплопроводности в итерациях метода приведено на рисунке 5.

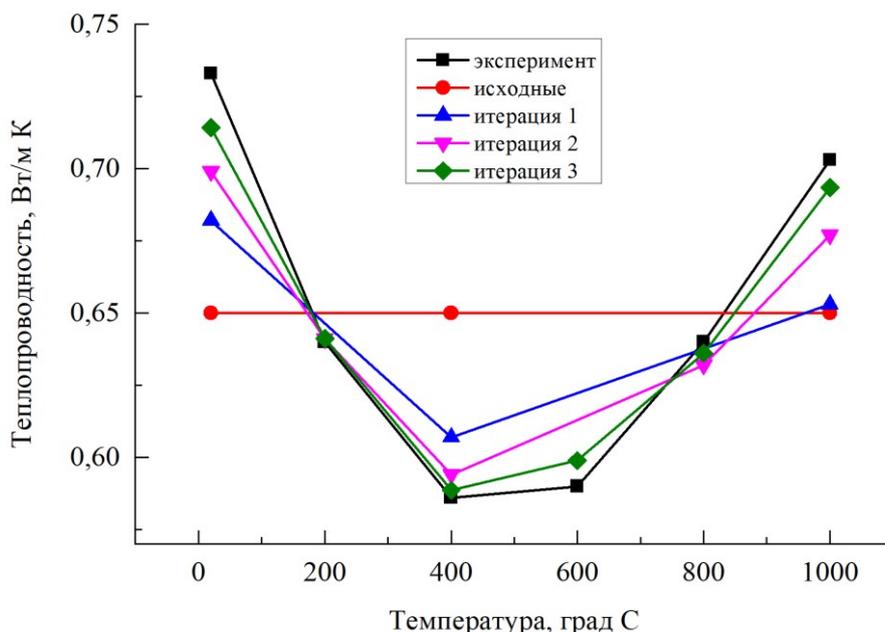


Рисунок 5 – Восстановление температурной зависимости теплопроводности в верифицирующем расчете: *эксперимент* – зависимость, соответствующая эталонному расчету, *исходные* – исходное значение теплопроводности в 1 итерации; *итерация 1, 2, 3* – зависимости после 1, 2 и 3 итераций

Разработанный метод за 3 итерации восстанавливает температурные зависимости теплофизических свойств выбранного материала. В диссертации подробно описаны шаги решения. Соответствующие распечатки рабочего окна MatLab с программными кодами, комментариями и расчетными результатами верифицирующего эксперимента приведены в приложениях диссертации.

С использованием разработанного метода уточнены теплофизические свойства формовочных и стержневых смесей, применяемых в условиях УВЗ для изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок.

Четвертая глава представляет результаты настройки и верификации компьютерной модели процессов затвердевания крупногабаритных тонкостенных стальных отливок в песчаных литейных формах на базе отечественной САПР литейной технологии LVMFlow. С использованием уточненной модели исследованы факторы, влияющие на образование усадочных дефектов в отливках «Рама боковая» и «Балка надрессорная».

В проверочных расчетах найдены обязательные настройки компьютерной модели для отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная», которые обеспечивают точность вычисления температурных полей в программной среде LVMFlow. К таким настройкам относятся, в частности, шаг расчетной сетки (8 мм), параметры расширения геометрических тел (0.3 мм для литейной формы) и закрытия зазоров. Наиболее важным аспектом настроенной компьютерной модели являются уточненные теплофизические свойства материалов. На рисунке 6 показан результат повышения точности расчета температуры с использованием уточненной компьютерной модели.

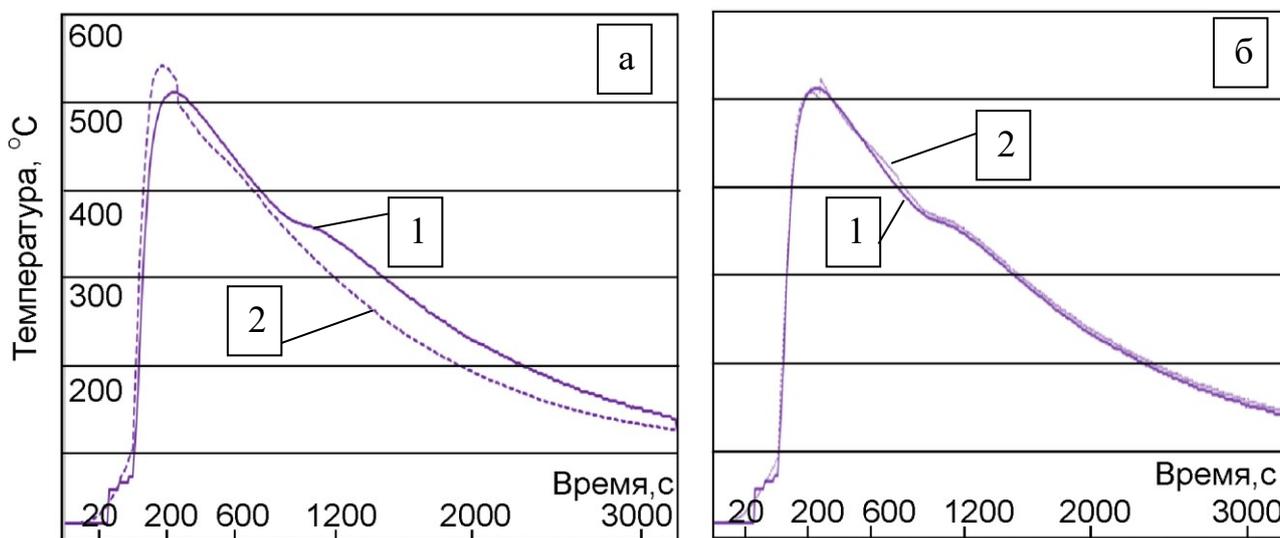


Рисунок 6 – Экспериментальные (1) и расчетные (2) температурные кривые при затвердевании отливки «Рама боковая» в песчано-глинистой форме с применением в компьютерной модели неуточненных (а) и уточненных (б) свойств материалов формы

На уточненной компьютерной модели исследовано влияние технологических факторов на образование дефектов в крупногабаритных тонкостенных стальных отливках. На рисунке 7 показан результат более точного прогнозирования усадочной раковины в подпятниковой зоне отливки «Балка надрессорная» в сравнении с реальным расположением дефектов.

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.

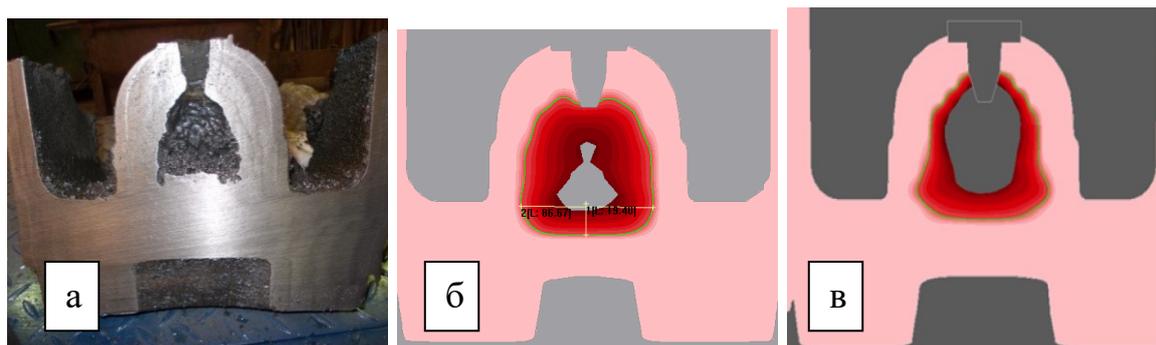


Рисунок 7 – Усадочная раковина в сечении подпятниковой зоны отливки «Балка надрессорная»: фактическая (а) и спрогнозированная конфигурация раковины при использовании неуточненной (б) и уточненной (в) базы данных формовочных материалов

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

В вычислительных экспериментах 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 могут оказывать влияние на динамику заполнения формы расплавом и образование технологических дефектов типа недолив. Установлено, что температура заливки в пределах допустимого технологического интервала не оказывает влияния на характер заполнения формы расплавом. Изменение количества металла в стопорном ковше влияет на изменение времени заполнения литейной формы. В конце разливки ковша скорость заполнения падает до 47% от начальной скорости. Увеличение диаметра выходного отверстия стопорного ковша с 35мм до 40мм дает пропорционально увеличение скорости заливки формы на 20%.

Исследовано влияние различных типов литниковых систем (ЛС) на время заполнения литейной формы и характер течения расплава. 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) ЛС для одновременной заливки через два стояка с использованием специального заливочного приспособления. Установлено, что наименьшая скорость течения расплава на выходе из литниковой системы обеспечивается при использовании серийной ЛС; 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» 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. Установлено, что наименьшая скорость течения расплава на входе в полость отливки обеспечивается при использовании ЛС с питателями в каждом торце отливки.

В пятой главе представлены результаты совершенствования технологии изготовления крупногабаритных тонкостенных стальных отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная» в условиях УВЗ с использованием уточненной компьютерной модели.

Анализ данных об относительном вкладе различных литейных дефектов в общий объем брака отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная», производимых в условиях УВЗ, свидетельствует о преобладании усадочных дефектов в отливках, изготовленных по исходной технологии (таблица 2) в 2010 г. Поэтому совершенствование технологии в данной работе было направлено на снижение брака по усадочным дефектам. Технологические решения были приняты после анализа большого объема расчетных данных.

Таблица 2 – Распределение по видам брака отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная», изготовленных 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

Для повышения результативности работы прибылей предложено использовать экзотермические стержни-вставки, которые конструктивно состоят из двух частей – погружной и удерживающей. Для уточнения геометрии погружной части проведены вычислительные эксперименты (рисунок 8) по расчету температурных полей.

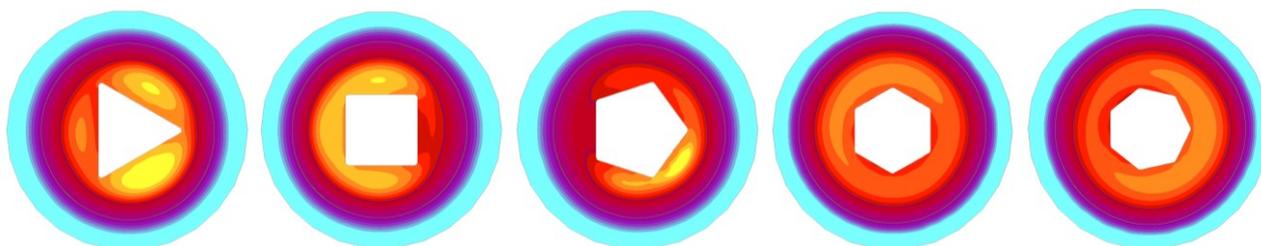


Рисунок 8 – Температурные поля в сечениях прибылей с различными видами стержней-вставок в момент времени 100 с после заливки

Из результатов моделирования следует, что чем меньше число граней в рабочей части экзотермического стержня-вставки, тем выше температура металла в контакте со вставкой. Таким образом, в вычислительном эксперименте подтверждается предположение о более интенсивном прогреве металла и более долговременной работе прибылей с конструкцией стержней-вставок, имеющих погружную часть в виде усеченной n-гранной пирамиды. Оптимальным является число граней от трех до пяти. Компьютерное моделирование подтверждает отсутствие усадочных дефектов в стенке отливки (рисунок 9) в случае применения экзотермического трехгранного стержня в верхней части отводной прибыли.

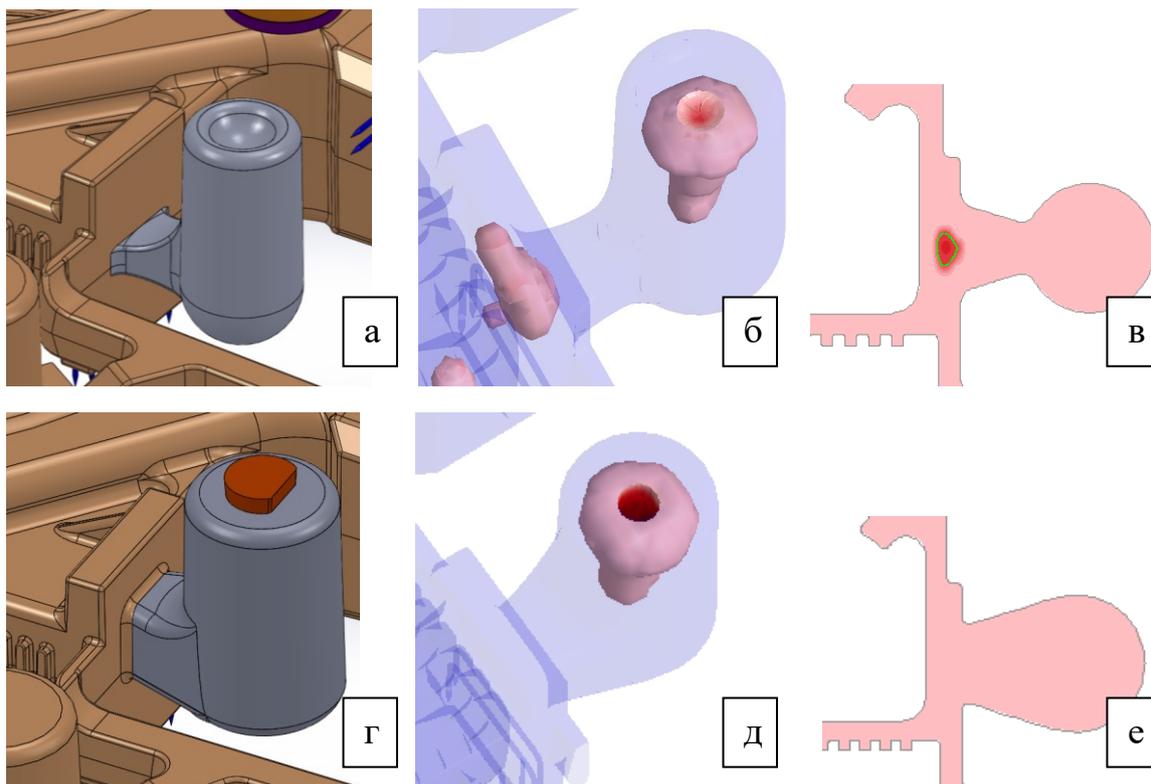


Рисунок 9 – Геометрия отводной прибыли без стержня (а) и с экзотермическим стержнем (г), усадочные дефекты в объеме (б, д) и в сечении (в, е)

По результатам проведенных исследований были изготовлены промышленным способом экзотермические стержни-вставки с количеством граней от 3 до 5; оформлены и получены 3 патента на полезную модель и 3 патента на промышленные образцы, в которых сформулировано новое техническое решение.

С использованием уточненной компьютерной модели выполнен большой объем вычислительных экспериментов, в которых варьировались: расположение прибылей (рисунок 10), конструкции и расположение литниковых систем (рисунок 11), размер и расположение холодильников, установка дополнительных выпоров и технологических ребер.

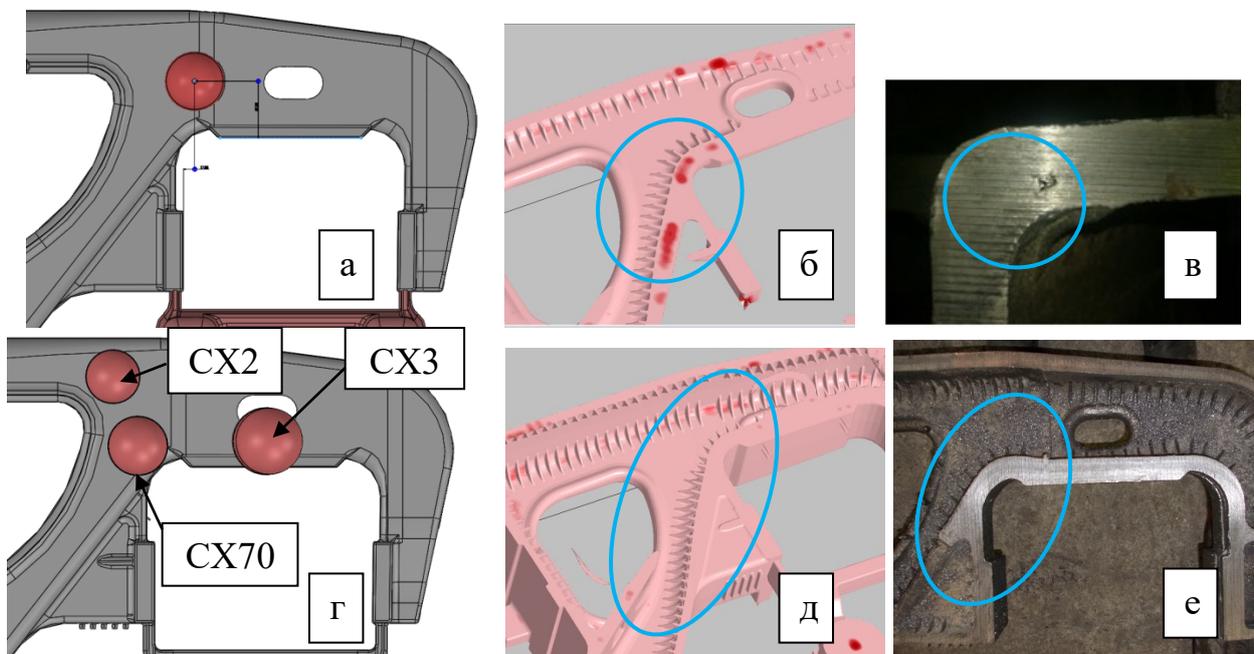


Рисунок 10 – Варианты расположения прибылей (а, г) и усадочные дефекты в горизонтальных сечениях (б, в, д, е) отливки «Рама боковая»

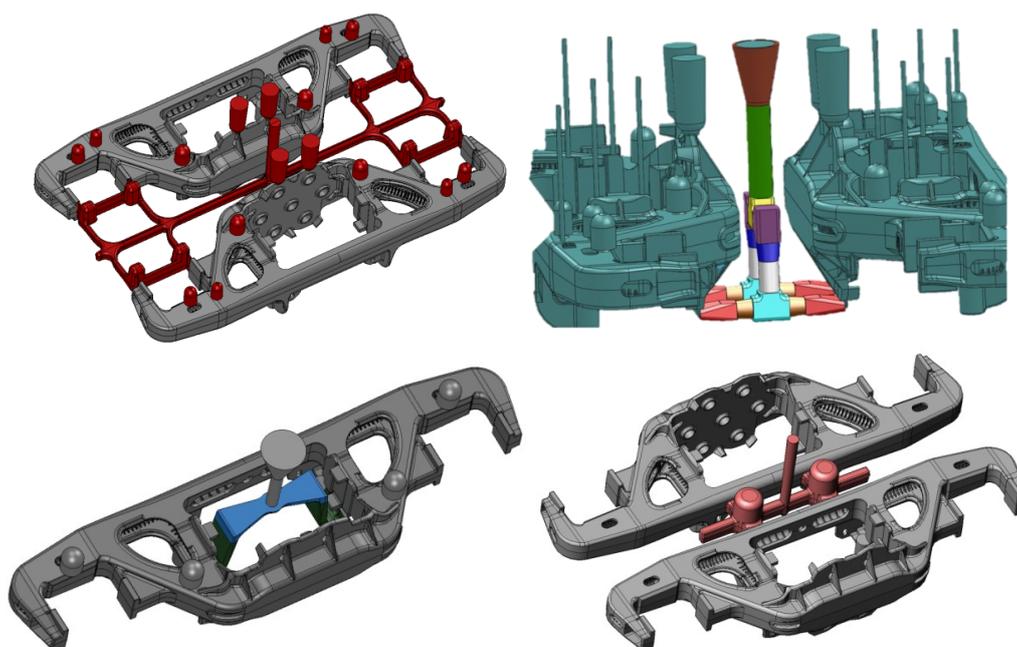


Рисунок 11 – 4 варианта литниковой системы из 15 исследованных

По результатам компьютерного моделирования внесены изменения в технологию изготовления отливок «Рама боковая» и «Балка надрессорная».

Для отливки «Рама боковая» в технологию внесены изменения: заполнение формы через один стояк по литниковому ходу через центробежный шлакоуловитель и подводом металла в «челюсти» рамы через 4 питателя; увеличенные внутренние холодильники в кронштейне триангеля (диаметр $d=22$ мм, высота $l=160$ мм); дополнительные 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 СХ-70, СХ-3 и СХ-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.

Для отливки «Балка наддресорная» 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 трехгранных стержня в верхней части внутренних неудаляемых прибылей в зоне пятника; наружные холодильники размерами $51 \times 37 \times 34$ мм (8 штук) массой $0,2$ кг каждый, а также наружные холодильники размерами $97 \times 19 \times 20$ мм (4 штуки) массой $0,2$ кг каждый.

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

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

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 прибыли 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 % (в 2010 г.) до 3 % (в 2020 г.), для отливок «Балка надрессорная» с 42 % (в 2010 г.) до 4 % (в 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.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. 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; (0.49 п.л./ 0.16 п.л.).

2. 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; (0.75 п.л./ 0.25 п.л.).

3. **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; (0.6 п.л./ 0.2 п.л.).

4. 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; (0.3 п.л./ 0.15 п.л.) (Scopus, WoS).

Огородникова О. М. Связанный анализ технологических процессов и нагруженных состояний литой детали / О. М. Огородникова, **С. В. Мартыненко** // Металлы. – 2012. – № 5. – С. 19-21; (0.3 п.л./ 0.15 п.л.).

5. 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; (0.36 п.л./ 0.18 п.л.) (Scopus, WoS).

Огородникова О. М. Применение алгоритма Левенберга-Марквардта в компьютерном моделировании литейных дефектов / О. М. Огородникова, **С. В. Мартыненко** // Дефектоскопия. – 2014. – № 5. – С. 65-70; (0.36 п.л./ 0.18 п.л.).

6. Ogorodnikova O. M. Reconstruction of thermo-physical properties to improve material database for casting simulation / O. M. Ogorodnikova, S. V. Yeltsin, **S. V. Martynenko** // Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 971. – AN 032089; (0.36 п.л./ 0.12 п.л.) (Scopus, WoS).

Патенты:

7. Патент 2731710 РФ, МПК С21С 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., Чащин А. А., Чернов А. В.; заявитель и патентообладатель АО «НПК Уралвагонзавод». – Изобретения. Полезные модели. – Бюл. № 25. – 7 с.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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., Ключкина О. С., Филиппенков А. А.; заявитель и патентообладатель АО «НПК Уралвагонзавод». – Изобретения. Полезные модели. – Бюл. № 10. – 10 с.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

Другие публикации:

16. **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; (0.08 п.л./ 0.04 п.л.).

17. 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; (0.18 п.л./ 0.06 п.л.).

18. 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; (0.08 п.л./ 0.04 п.л.).

19. **Мартыненко С. В.** Моделирование литейных процессов и конструирование модельной оснастки / С. В. Мартыненко // Металлургия для машиностроения : Труды второй международной научно-практической конференции УГТУ-УПИ, 27 ноября - 1 декабря 2006 г. – Екатеринбург, 2006. – С. 38; (0.08 п.л.).

20. **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; (0.24 п.л./ 0.08 п.л.).
21. 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; (0.15 п.л./ 0.05 п.л.).
22. **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; (0.24 п.л./ 0.12 п.л.).
23. **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; (0.27 п.л./ 0.09 п.л.).
24. 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; (0.4 п.л./ 0.2 п.л.).
25. 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; (0.36 п.л./ 0.12 п.л.).
26. **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; (0.3 п.л.).
27. **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 АО «НПК Уралвагонзавод» (Нижний Тагил, 15-18 мая 2017 г.). Нижний Тагил: УВЗ, 2017. С. 37-44; (0.48 п.л./ 0.24 п.л.).