

На правах рукописи



КУЗОВОВ СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ  
ОБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН В ФАСОННЫХ  
СТАЛЬНЫХ ОТЛИВКАХ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Специальность 2.6.3 – Литейное производство (технические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, 2021 г.

Работа выполнена на кафедре «Машиностроение и материаловедение» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянского государственного технического университета» (ФГБОУ ВО БГТУ)

Научный руководитель **Макаренко Константин Васильевич** доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», г. Брянск.

Официальные оппоненты: **Коротченко Андрей Юрьевич**, д.т.н., доцент, зав. кафедрой «Литейные технологии» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

**Нуралиев Фейзулла Алибала оглы**, к.т.н., доцент, зав. лабораторией «Литейные процессы» АО «НПО «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения», г. Москва.

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва.

Защита диссертации состоится 24 ноября 2021 года в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.327.05 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д.3, аудитория № 523А.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета и по электронной почте [paltievichar@mati.ru](mailto:paltievichar@mati.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте <https://mai.ru/events/defence/>.

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
24.2.327.05, к.т.н., доцент



Палтиевич А.Р.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** На сегодняшний день литейное производство остается основной заготовительной базой в машиностроении. К категории отливок ответственного назначения относятся изделия, работающие в сложных эксплуатационных условиях, к которым предъявляются высокие требования качества, ряд которых используется в узлах и устройствах грузовых вагонов железнодорожного транспорта, который, являясь одним из важнейших видов транспорта в Российской Федерации, играет значимую роль в обеспечении работы отечественной экономики. В связи с этим, обеспечение отечественного машиностроения качественными литыми изделиями является актуальным направлением научных исследований.

Фасонные отливки, изученные в работе, имеют следующие отличительные особенности: сравнительно большая масса и, как следствие, большие габаритные размеры; сложная конфигурация, представленная в основном корпусными изделиями, в которых имеется большое количество рассредоточенных тепловых узлов, обусловленных конструкционной сложностью изделия и наличием многочисленных переходов от толстой к тонкой стенке. Их получают из низкоуглеродистых легированных сталей марок 20ГЛ, 20ГТЛ или 20ГФЛ, которые склонны к развитию усадочных напряжений и имеют сравнительно широкий интервал кристаллизации. В таких условиях вероятность развития усадочных дефектов, в частности горячих трещин (ГТ) очень велика. Стандарты предъявляют высокие требования к качеству отливок, в частности, особо повышенное внимание уделяется трещинам, которые в процессе эксплуатации изделия, выступая в качестве потенциального концентратора напряжений, могут приводить к переходу детали из опасного в предельное состояние, а при катастрофическом исходе к потере целостности. Согласно статистическим данным, приведенным в работах Ю.Ф. Воронина, А.В. Монастырского, О.М. Огородниковой, Е.А. Чернышова, Д.В. Шиханова, стальные отливки с литейными дефектами, в особенности с ГТ, приводят к большому числу аварий.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблеме образования ГТ в стальных отливках посвящено большое количество работ различных именитых ученых-литейщиков. Помимо вышеупомянутых авторов, необходимо отметить труды таких исследователей как Г.Ф. Баландина, А.И. Батышева, К.Н. Вдовина, В.М. Грузмана, Б.Б. Гуляева, В.Б. Деева, Л.С. Константинова, А.М. Королькова, А.Ю. Коротченко, Ю.А. Нехендзи, А.А. Рыжикова, А.С. Савинова, Н.А. Трубицына, А.П. Трухова, А.Я. Шатова, M. Rappaz, D.M. Stefanescu, C. Beckermann, C. Monge, V. Santillana, B.G. Thomas. Их работы в области изучения влияния различных факторов на образование ГТ, методов исследования и разработки теоретических моделей механизмов возникновения ГТ и технологических способов, направленных на ликвидацию данного литейного дефекта в отливках, являются без преувеличения фундаментальными в данной области. Среди зарубежных авторов активно используются и разрабатываются новые немеханические критерии. В настоящее время наиболее широко используемым критерием в литейной практике является критерий RDG (по заглавным буквам фамилий его разработчиков Rappaz, Drezet и Gremaud).

Можно выделить три основных направления борьбы с ГТ: изменение конструкции отливки; увеличение прочности металла в температурном интервале образования ГТ (ТНОГТ); увеличение податливости элементов рабочей полости литейной формы. Однако, некоторые способы ограничены техническими требованиями, которые предъявляются к фасонным отливкам ответственного назначения, а другие уже применяются и не решают проблему в полном объеме. Поэтому разработка новых способов борьбы с ГТ остается актуальной задачей в области литейного производства.

**Целью работы** является разработка и исследование способа предотвращения образования поверхностных ГТ, основанного на управлении процессами структурообразования при затвердевании поверхностной зоны фасонных стальных отливок.

**Задачи работы:**

1. Проанализировать современное состояние проблемы образования ГТ, оценить факторы, оказывающие влияние на их возникновение, и способы борьбы с данным дефектом в фасонных стальных отливках.
2. Провести исследования дефектной зоны ГТ для выявления морфологических особенностей строения сплава, которые можно использовать для предотвращения образования дефекта.
3. На основании результатов исследования разработать способ обеспечения требуемой структуры в поверхностной зоне отливки, повышающей трещиностойчивость в температурном интервале образования ГТ.
4. Внедрить разработанный способ в производственный процесс получения фасонных стальных отливок ответственного назначения.

**Объект исследования** – фасонные стальные отливки ответственного назначения, склонные к образованию ГТ.

**Предмет исследования** – механизм образования поверхностных ГТ в фасонных стальных отливках, формирование структуры и свойств сплава в поверхностной зоне отливок при температурах образования ГТ и способ повышения трещиностойчивости, основанный на управлении процессами структурообразования в поверхностной зоне отливок путем изменения микрорельефа поверхности рабочей полости литейной формы.

**Научная новизна работы:**

1. Доказано, что выявленная морфология поверхностных ГТ, обусловлена возникновением характерного «веерного» строения зоны столбчатых дендритных кристаллов в узлах отливок, имеющих радиальные сопряжения конструктивных элементов, которое приводит к частичной коалесценции ветвей второго порядка дендритных кристаллов и образованию ГТ.
2. Уточнен критерий образования горячих трещин RDG, в котором скорость изотермы ликвидуса в зоне роста столбчатых дендритных кристаллов рассчитывается с учетом угла между группами соседних дендритов, который образуется при кристаллизации в узлах отливок, имеющих радиальные сопряжения конструктивных элементов.

3. Выявлен и обоснован комплексный механизм влияния микрорельефа рабочей полости песчано-глинистой литейной формы, образующегося в результате нанесения функционального покрытия, который приводит к формированию упрочненного слоя из мелкодисперсных разнонаправленных кристаллов в поверхностной зоне отливки, рассредоточению усадочных напряжений и препятствует образованию поверхностных ГТ.
4. Разработана методика расчета формирования поверхностной зоны фасонных стальных отливок в песчано-глинистой форме с функциональным покрытием определенного микрорельефа на основе синтеза решений тепловых и кристаллизационных задач литья, учитывающих начальное распределение температуры расплава после заполнения формы, рельефность покрытия, его смазываемость, теплообмен последнего с формой, а также условий зарождения и роста кристаллов.

#### **Практическая значимость:**

1. Разработана методика исследования дефектной зоны и классификация, позволяющая идентифицировать трещины в фасонных отливках, в зависимости от их природы и особенностей механизмов образования.
2. Разработан способ повышения трещиностойкости стали, основанный на изменении структуры в поверхностной зоне отливки путем использования функционального покрытия на базе хромитового песка определенной фракции, которое обеспечивает заданный микрорельеф поверхности рабочей полости песчано-глинистой литейной формы.
3. Результаты работы опробованы и внедрены в производственный процесс по получению стальных фасонных отливок ответственного назначения на АО «ПО «Бежицкая сталь» (г. Брянск)

#### **Методология и методы исследования**

Работа выполнена с применением современных методов исследования. Химический состав стали изучался при помощи оптико-эмиссионного спектрометров OBLF GS1000 II и Spectrolab M-8. Микроструктурные исследования проводились на инвертированных цифровых микроскопах Leica DM IRM (Германия) и MDS (США). Образцы для изучения твердости вырезались методом электроэрозионной обработки на проволочно-вырезном станке ДК-7755УМ11 (Россия). Подготовка шлифов для исследования макро- и микроструктуры сплава была выполнена на программируемом автоматическом шлифовально-полировальном станке COMPUMET. Для получения металлографических шлифов использовали пневмогидравлический пресс IPA 40 (Италия). Измерения твердости промышленных отливок выполнялись на твердомере TP 5006M (Россия). Для измерения твердости проб-отливок использовался универсальный цифровой твердомер KB 30 S (Германия). Результаты измерений обрабатывались в автоматическом режиме с использованием специализированного программного обеспечения KB HardWin XL. Термический анализ в пристеночной зоне проводили посредством измерительной системы, состоящей из нескольких цифровых интеллектуальных датчиков температуры Zet 7020 – Termo TC – 485 и программного обеспечения ZETLab Registration на базе портативного ПК с использованием термопреобразователей типа BP 5/20.

Математико-статистическая обработка данных проводилась с применением стандартного пакета анализа данных в программе MS Excel, компьютерное моделирование выполнено в системе NX компании «Siemens PLM Software». Получение 3D-моделей поверхностей рабочей полости литейной формы проводили с использованием компьютерной программы Pr3DModel для объемной реконструкции изображений.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Методика исследования и идентификации ГТ в фасонных стальных отливках ответственного назначения.
2. Результаты исследования механизма образования ГТ с учетом особенностей структурного строения поверхностной зоны отливки в зоне образования дефекта при кристаллизации.
3. Выявленные экспериментальные и теоретические закономерности влияния микрорельефа поверхности рабочей полости песчано-глинистой литейной формы на структуру поверхностной зоны отливки при затвердевании и расщепление усадочных напряжений.
4. Результаты экспериментальных и опытно-промышленных работ, полученные в ходе исследований, направленных на снижение брака фасонных стальных отливок ответственного назначения по причине образования ГТ.

**Степень достоверности работы.** Достоверность результатов диссертационной работы обосновывается использованием современного оборудования, стандартизированных и проверенных методик исследования, воспроизводимостью результатов, глубоким и всесторонним литературным анализом по исследуемой тематике, согласованностью полученных в работе результатов с современным состоянием вопроса в литейной отрасли, а также применением испытанных методов математико-статистической обработки данных. В представленных исследованиях используется статистический материал, полученный в результате изучения большого количества случаев появления ГТ в течении длительного периода времени на производстве.

**Апробация результатов работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических мероприятиях: II Международной заочной конференции «Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве» (2013 г., Орск); 2-й Международной молодежной научной конференции «Поколение будущего: Взгляд молодых ученых» (13-15 ноября 2013 г., г. Курск); 5-й Международной научно-технической конференции «Современные инновации в науке и технике» (16-17 апреля 2015 г., г. Курск); XV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» (23-24 апреля 2015 г., г. Гомель, Республика Беларусь); 7-й Международной научно-технической конференции «Проблемы обеспечения и повышения качества и конкурентоспособности изделий машиностроения и авиадвигателестроения (ТМ-2015)» (21-23 сентября 2015 г., г. Брянск); VIII Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» (16-20 ноября 2015 г., г. Москва); XI Съезде литейщиков России «Черные сплавы. Сталь» (7-11 сентября 2015 г., г. Нижний Новгород); 11-й Международной научно-практической

конференции, посвященной 120-летию со дня рождения профессора Наума Григорьевича Гиршовича «Литейное производство сегодня и завтра» (15-17 июня 2016 г., Санкт-Петербург); IX Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» (14-17 ноября 2017 г., г. Москва), 29-й Международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон-2019» (23-26 сентября 2019 г., г. Брянск); Международной научно-технической конференции «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники» (19-20 февраля 2020 г., г. Брянск); X Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» (9-13 ноября 2020 г., г. Москва). В рамках Шестой Международной научно-практической конференции «Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке и образовании» (22-23 октября 2014 г., г. Брянск) автором получен диплом победителя программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») за разработку «Технологии повышения трещиностойкости низкоуглеродистых легированных сталей».

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликованы 26 научных работ в журналах и различных сборниках трудов российских и международных конференций, 13 работ в изданиях, рекомендованных ВАК, в том числе 2 работы из перечня научных изданий, входящих в международные реферативные базы данных, получен патент на изобретение.

**Личный вклад** автора состоит в теоретическом обосновании целей и задач исследования, проведении экспериментальных и организации опытно-промышленных работ, обработке полученных экспериментальных данных, обобщении результатов исследований, обосновании научных гипотез и их подтверждении, подготовке статей и их публикации, участии в конференциях. Промышленное внедрение результатов исследования организовано при непосредственном участии автора.

#### **Соответствие диссертации паспорту специальности**

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорту специальности 2.6.3 – Литейное производство по следующим областям исследований: 1 – «Исследование физических, физико-химических, теплофизических, технологических и служебных свойств материалов, как объектов и средств реализаций литейных технологий»; 2 – «Исследование тепло- и массопереноса, гидродинамических, реологических и других процессов, происходящих в расплавах, отливках и литейных формах»; 12 – «Исследование проблем качества литья»; 14 – «Исследование процессов формирования свойств литейных сплавов и формовочных смесей».

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений, излагается на 211 страницах, содержит 73 рисунка и 16 таблиц. Список литературы включает 270 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** показана актуальность исследований по теме диссертационной работы, дана общая характеристика работы, представлены научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** приведен анализ современных представлений о процессе образования ГТ в отливках, рассмотрено влияние различных условий и технологических факторов на трещиностойкость. Приведен обзор существующих критериев, используемых для прогнозирования ГТ в отливках. В производственных условиях, прежде всего, стараются корректировать такие параметры технологического процесса, как податливость форм и стержней, конструкцию литниково-питающей системы в части питания отливки или отдельных ее узлов, а также температуру заливки форм и химический состав сплава. Между тем, склонность к образованию ГТ во многом зависит от механических свойств расплава в ТИОГТ. Из работ Б.Б. Гуляева, Г.Ф. Баландина, А.М. Королькова, Ю.А. Нехендзи, И.И. Новикова, D.M. Stefanescu, M. Rappaz следует, что структурные характеристики сплава в процессе кристаллизации, в том числе оказывают влияние на его способность противостоять образованию ГТ. В связи с этим, перспективным и малоизученным является способ, основанный на работах таких ученых как: В. Н. Карножицкий, И.И. Новиков, А.Н. Цибрик, Н.И. Хворинин, А. Оно по изучению влияния микрорельефа поверхности, раздела «металл – форма» на формирование структуры в поверхностной зоне отливок и позволяющий повышать уровень механических свойств в ТИОГТ. На основании проведенного анализа литературных данных были сформулированы цель и задачи работы.

**Во второй главе** изложены методы исследований. В ходе исследований был проведен детальный анализ более 350 забракованных стальных отливок, содержащих трещины. Наиболее пристальное внимание уделялось следующим зонам: для отливки «Рама боковая» – внешний и внутренний радиусы R55 буксового проема, для отливки «Корпус автосцепки» – внутренний радиус R18 в хвостовике. Конфигурация изделия и используемая литейная технология способствуют концентрации в этих зонах дефектов ГТ, которые в соответствии с требованиями нормативной документации являются неисправимым браком и подвергаются тщательному контролю.

В частности, для определения размерно-топологических параметров и изучения микрорельефа поверхности песчано-глинистой литейной формы были получены трехмерные модели, как в случае обычной поверхности литейной формы, так и в случае поверхности с функциональным покрытием на основе хромитового песка различных фракций. Так как поверхность имеет нерегулярный микрорельеф, для оценки меры шероховатости использовался коэффициент формы  $K_f$ , учитывающий отличия фактической площади поверхности от геометрической, в зависимости от степени ее рельефности (таблица 1).

Таблица 1 – Характеристики поверхности песчано-глинистой литейной формы в зависимости от технологии изготовления

Поверхность	$K_f$
без функционального покрытия	1,15
с функциональным покрытием на основе хромитового песка фракции 0,2	1,22
с функциональным покрытием на основе хромитового песка фракции 0,4	1,41



Расчет был выполнен по следующей формуле:

$$K_{\phi} = \frac{S_{\pi}}{S_{\pi_0}}, \quad (1)$$

где  $S_{\pi}$  и  $S_{\pi_0}$  – фактическая и геометрическая площади поверхности,  $m^2$ .

Анализ трехмерных моделей в системе NX компании «Siemens PLM Software» позволил получить значение фактической площади поверхности трехмерной модели  $S_{\pi}$ .

**В третьей главе** представлены результаты исследования морфологических особенностей строения ГТ и дефектной зоны. Доказано, что на процесс образования ГТ в отливках могут оказывать влияние второстепенные факторы, в частности газы, растворенные в металле и выделяющиеся в процессе затвердевания. Действие газовой составляющей на образование дефектов, в том числе в их глубинной части, подтверждено металлографическим анализом строения дефекта. Изучение поперечных разрезов дефекта позволило получить информацию о морфологических особенностях строения ГТ и разделить их на три группы по механизму образования. В первую группу вошли ГТ, которые образуются под действием только усадочных напряжений, к которой, в частности, относятся поверхностные ГТ. Во вторую – газовые трещины, причиной появления которых стали газы, растворенные в металле и третью группу, образуют дефекты смешанной газо-усадочной природы, когда влияние газовой составляющей незначительно и лишь усиливает ведущую роль усадочных напряжений.

В результате изучения фрактограмм был сделан вывод, что по строению ГТ чаще всего состоят из объединенных нескольких надрывов, расположенных каскадом (ступенчато), боковые поверхности которых имеют ярко выраженное дендритное строение.

Исследование макроструктуры дефектной зоны ГТ, выявленной в отливках, показывает, что ориентация главных ветвей дендритов связана с кривизной поверхности в конструкционных узлах отливок, имеющих радиальные сопряжения. Независимо от значения радиуса кривизны, в зонах конструкционных узлов главные ветви дендритных кристаллов образуют типичное расходящееся «веерное» строение с ортогональной ориентацией к границе раздела «металл-форма» (рисунок 1).

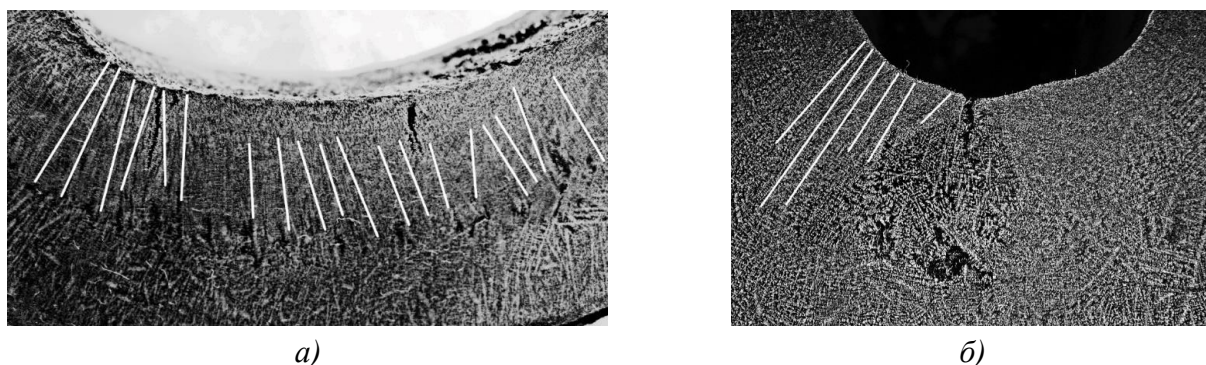


Рисунок 1 – Модель дендритного «веерного» строения в участках отливки, склонных к образованию ГТ (белые линии нанесены поверх снимка и повторяют направление роста главных ветвей дендритов): а – «Рама боковая», R55; б – «Корпус автосцепки», R18

Как следует из анализа ориентации трещин, представленная структура отливки не обеспечивает необходимый уровень механических свойств в ТИОГТ.

Ослабление структуры обусловлено частичной коалесценцией соседних дендритов, растущих не параллельно друг другу, как принято в большинстве теоретических моделей, а под определенным углом. В результате соседние дендриты имеют небольшое количество точек соприкосновения, что отрицательно сказывается на прочности в ТИОГТ. Наличие прослоек жидкого расплава между кристаллами, приводит к возникновению эффекта адсорбционного понижения прочности. Анализ критериев образования ГТ показал, что в настоящее время активно используются и разрабатываются критерии, которые учитывают влияние структуры металла, в частности дендритной.

Одним из наиболее часто используемых в литературе последних лет критериев, является критерий RDG. Критерий подразумевает, что, если создаются условия, при которых давление в междендритном пространстве падает ниже кавитационного, это приводит к формированию несплошностей в затвердевающем слое отливки, что при локализации напряжений приводит к образованию ГТ.

В основе данного критерия лежит модельное представление, при котором соседние дендриты растут параллельно друг другу, он не учитывает отклонение роста дендритов при затвердевании. Однако как показали исследования в узлах отливок, имеющих радиальные сопряжения конструктивных элементов наблюдается угол разориентировки  $\phi$ , образующийся между дендритами (рисунок 2).

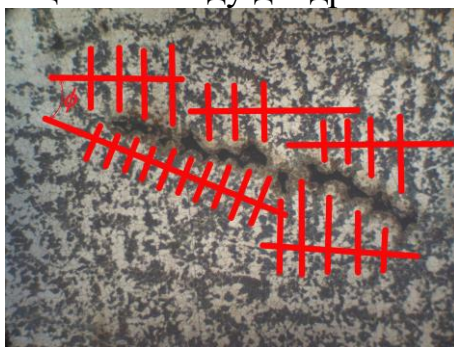


Рисунок 2 – Возникновение ГТ в случае частичной коалесценции и наличии угла разориентировки  $\phi$  между дендритными кристаллами (красные линии нанесены поверх снимка и повторяют направление роста главных и ветвей второго порядка дендритов)

В случае криволинейной поверхности, при расчете максимального падения давления ( $\Delta p_{max}$ ) в междендритном промежутке, скорость роста дендрита в зоне столбчатых кристаллов будет зависеть от угла между дендритами кристаллами  $\phi$  и определяться геометрией дефектной зоны отливки. Критическое падение давления может быть определено по формуле:

$$\Delta p_{max} = \frac{180(1 + \beta)\mu}{\lambda_2^2 G} \int_{T_s}^{T_L} \frac{f_s^2 \int_{T_{коал}}^T f_s dT}{(1 - f_s)^3} dT + \frac{180\mu\beta \sqrt{\frac{V_t}{\cos\phi}}}{\lambda_2^2 G} \int_{T_s}^{T_L} \frac{f_s^2}{(1 - f_s)^2} dT, \quad (2)$$

где  $\beta$  – относительная объемная усадка, %;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $\lambda_2$  – междусный промежуток между ветвями второго порядка дендритов ортогонально ориентированных к поверхности раздела отливка – литейная форма, м;  $G$  – температурный градиент, К/м;  $V_t$  – скорость роста дендритов;  $\phi$  – угол между

расходящимися дендритами;  $f_s$  – объем твердой фракции в двухфазной зоне;  $T_L$  – температура ликвидус, К;  $T_s$  – температура солидус, К.

Принятие во внимание угла  $\varphi$  при расчетах позволяет учитывать процессы, происходящие не только на микроуровне (дендриты), но и явлениях макромасштаба, определяемых геометрией отливки.

**В четвертой главе** показана возможность повышения механических свойств стали в ТИОГТ путем изменения условий кристаллизации поверхностной зоны отливки. Разработан и обоснован способ создания определенного микрорельефа на поверхности рабочей полости песчано-глинистой литейной формы путем нанесения функционального покрытия на основе сыпучего материала. Изучены основные физико-технологические свойства разработанного функционального покрытия.

Образование ГТ, как показали исследования, происходит преимущественно в том случае, когда в поверхностном слое преобладает дендритная структура, представленная на рисунке 3. На основе синтеза приведенных выше исследований был разработан способ предупреждения образования поверхностных ГТ.

Данный способ заключается в том, что, изменяя локально микрорельеф поверхности литейной формы можно управлять процессами структурообразования и получать в поверхностной зоне отливок (в ее локальных участках) слой из мелкодисперсной разнонаправленной структуры, которая оказывает сопротивление растягивающим напряжениям и тем самым предотвращает образование ГТ в этих зонах.

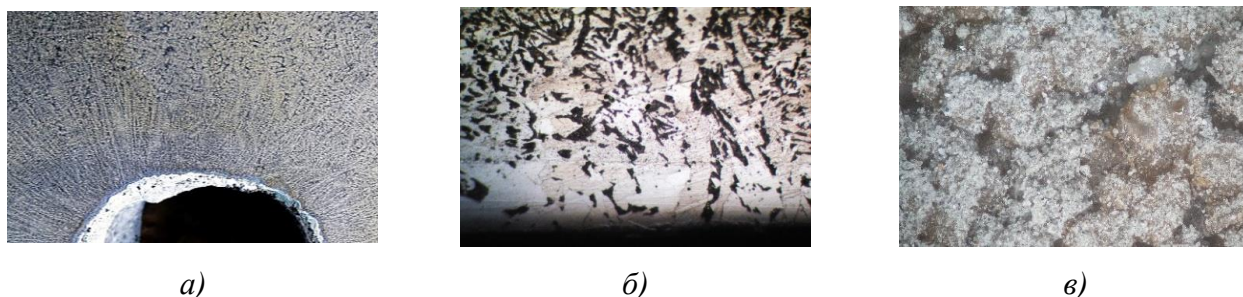


Рисунок 3 – Макро- (а,  $\times 2$ ) и микроструктура (б,  $\times 100$ ) стальных отливок в случае поверхности песчано-глинистой формы (в,  $\times 50$ ) без покрытия

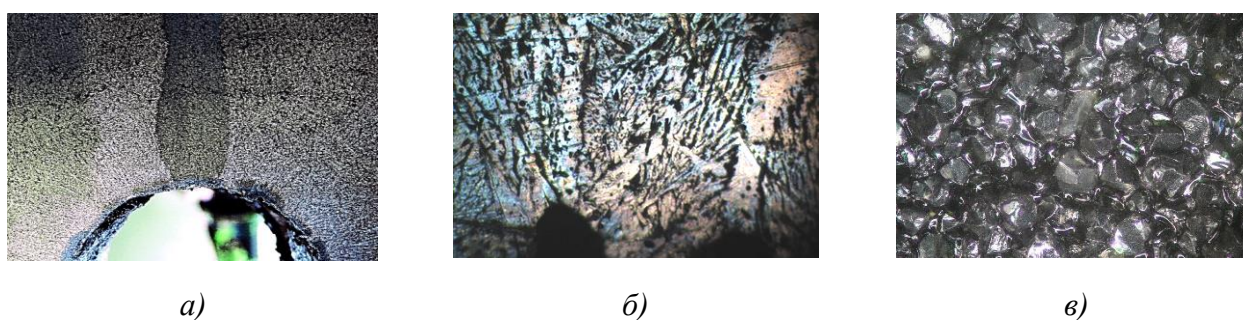


Рисунок 4 – Макро- (а,  $\times 2$ ) и микроструктура (б,  $\times 100$ ) стальных отливок в случае поверхности песчано-глинистой формы (в,  $\times 50$ ) с разработанным покрытием

Такой эффект может быть получен при помощи функционального покрытия, позволяющего создать на поверхности формы микрорельеф. Микрорельеф поверхности литейной формы будет способствовать отклонению направления теплового потока от нормали к поверхности контакта, особенно в вершинах (рисунок 4). Это



изменяет конфигурацию температурного поля, которое вблизи поверхности раздела будет по профилю повторять профиль микрорельефа поверхности литейной формы, что приводит к значительно более выраженному проявлению механизма выклинивания дендритов в поверхностной зоне отливки (рисунок 5).

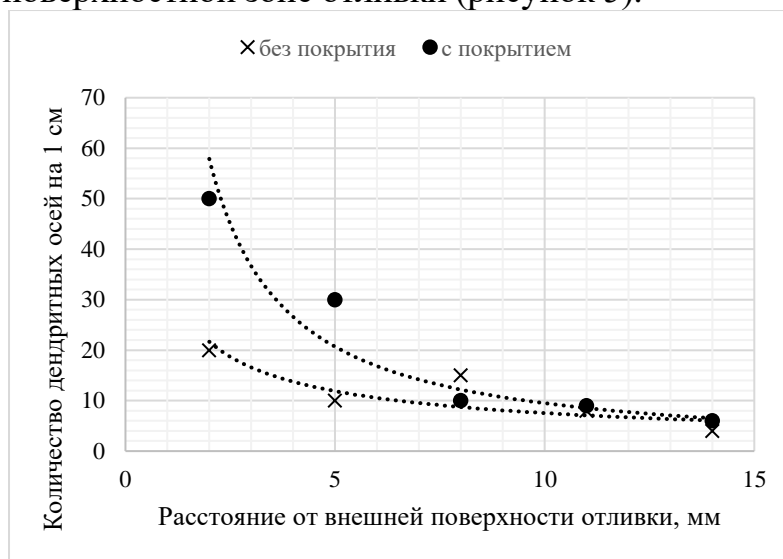


Рисунок 5 – Уменьшение количества дендритных осей главного направления роста в зависимости от расстояния от внешней поверхности

Вершины элементов микрорельефа, контактирующие с расплавом, являются потенциальной подложкой для гетерогенного зарождения и последующего роста кристаллитов, инициирующих процесс затвердевания в поверхностной зоне отливки.

Наибольшее влияние на площадь контакта хромитовой подложки и зарождающегося на ней центра кристаллизации (рисунок 6), оказывает размер зерна хромитового песка:

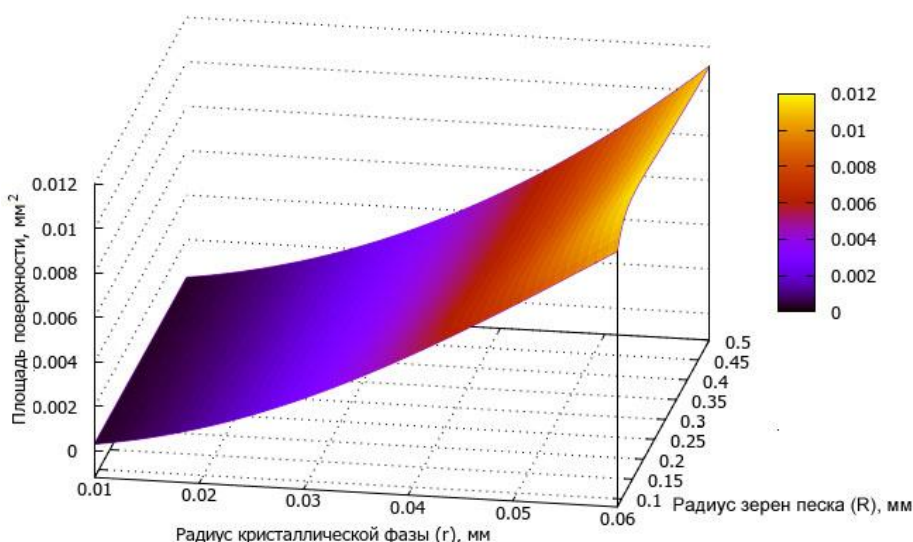


Рисунок 6 – Изменение площади ( $S$ ) поверхности кристаллического зародыша радиуса ( $r$ ), образующегося на условно сферическом зерне хромитового песка радиуса ( $R$ )

$$S = 2\pi R^2 \left( 1 - \frac{R - r \cos \theta}{\sqrt{r^2 + R^2 - 2rR \cos \theta}} \right), \quad (3)$$

где  $S$  – площадь контакта,  $m^2$ ;  $r$  – радиус критического зародыша,  $m$ ;  $\theta$  – краевой угол смачивания;  $R$  – радиус зерна хромита,  $m$ ;  $h$  – высота сферического сегмента,  $m$ .

Осыпаемость покрытия определяли на основе ГОСТ 23409.9-78 «Смеси формовочные и стержневые. Метод определения осыпаемости» (рисунок 7, а; таблица 2). Определение прочности к истиранию определялось на основе ГОСТ 10772-78 «Покрытия литейные противопрigarные водные» (рисунок 7, б; таблица 3).



а)



б)

Рисунок 7 – Фотография функционального покрытия после проведения испытаний на осыпаемость (а) и прочности к истиранию (б)

Таблица 2 – Результаты и исходные данные по определению осыпаемости функционального покрытия

N	Покрытие с фракцией хромитового песка 0,2 мм			Покрытие с фракцией хромитового песка 0,4 мм		
	1	2	3	1	2	3
$m, 10^{-3} \text{ кг}$	172,75	174,65	171,13	176,29	178,12	175,23
$m_1, 10^{-3} \text{ кг}$	172,06	173,81	170,53	175,21	177,16	174,02
$X, \%$	0,40	0,48	0,35	0,61	0,54	0,69
$X_{\text{ср}}, \%$	0,41			0,61		

Таблица 3 – Результаты и исходные данные по определению прочности покрытия к истиранию

N	Покрытие с фракцией хромитового песка 0,2 мм			Покрытие с фракцией хромитового песка 0,4 мм		
	1	2	3	1	2	3
$m, \text{ кг}$	1,23	1,25	1,21	1,24	1,23	1,25
$R_{\text{ср}}, \text{ кг/мм}$	3,97, более			1,94, более		
$l_1, \text{ мм}$	1,86			2,49		
$l, \text{ мм}$	1,55			1,85		

С целью исследования теплового взаимодействия отливки и формы с функциональным покрытием в процессе затвердевания, была разработана расчетная методика, включающая в себя расчётные уравнения по определению начального распределения температуры в форме после заливки (с учётом протока расплава через её участки), время затвердевания этих участков (с учетом эффективного коэффициента аккумуляции тепла формой  $b_{эф}$ ), особенностей их конфигурации и перепада температуры в них (рисунок 8).

Разработанная методика, позволяет определять значение эффективного коэффициента аккумуляции тепла формой с функциональным покрытием, время затвердевания участков отливки и линейную скорость кристаллизации при заданных значениях  $K_{ф}$  в конструкционных узлах отливок, имеющих радиальные сопряжения.

Для учета двухслойности литейной формы была использована методика расчета эффективного коэффициента аккумуляции тепла формы  $b_{эф}$  предложенная, А.А. Неуструевым, которая учитывает особенности отвода теплоты в ограниченную в тепловом отношении форму.

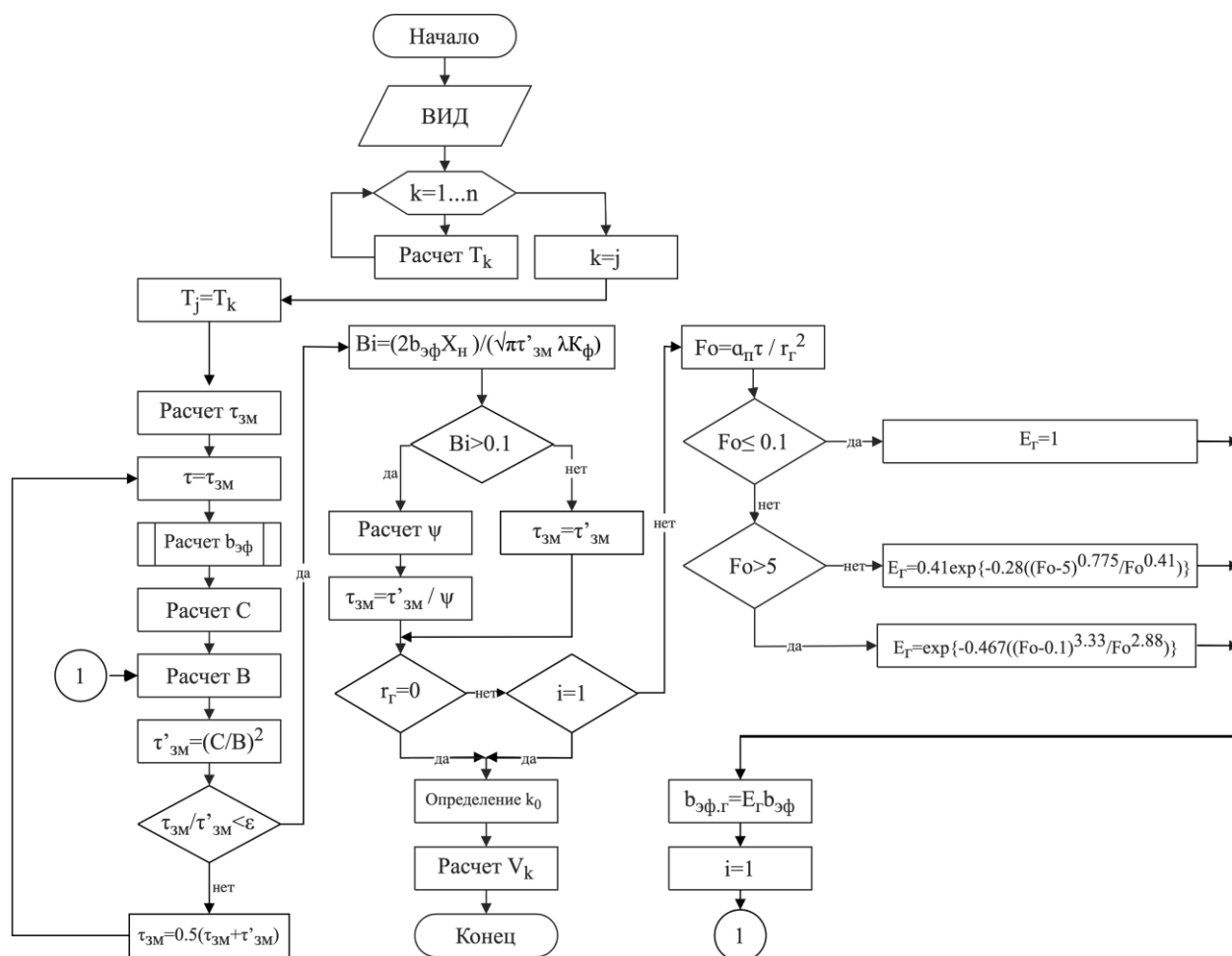
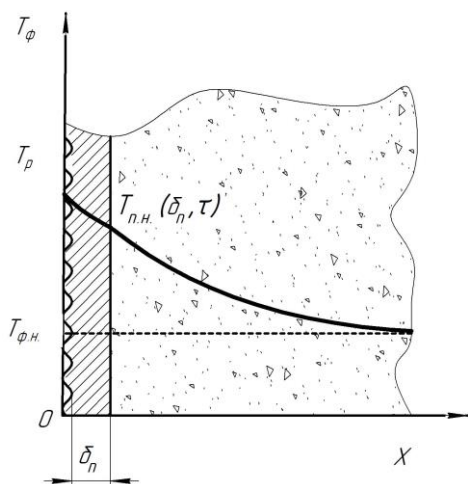


Рисунок 8 – Блок схема расчета скорости линейной кристаллизации отливки

В результате, формализованная схема распределения температуры в песчано-глинистой форме с функциональным покрытием (рисунок 9) и соответствующей математической моделью может быть представлена в следующем виде:



$$\frac{\partial T_{п}(x, \tau)}{\partial \tau} = a_{п} \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, 0 < x \leq \delta'_{п} \quad (4)$$

$$\text{где } \delta'_{п} = K_{\phi} \delta_{п}$$

Начальное условие:

$$T_{\phi}(x, 0) = T_{\phi.н.} \quad (5)$$

Граничное условие:

$$\left. \begin{aligned} T_{п.н.}(0, \tau) &= T_p; \\ -\lambda_{п} \frac{\partial T_{п}(\delta'_{п}, \tau)}{\partial x} &= \frac{b_{\phi}}{\sqrt{\pi \tau}} [T_{п}(\delta'_{п}, \tau) - T_{\phi.н.}] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Рисунок 9 – Схема распределения температуры в песчаной литейной форме с функциональным покрытием на основе хромитового песка

Ее решение, методами теории теплопроводности позволяет в конечном итоге найти расчетное уравнение для  $b_{\text{эф}}$ :

$$b_{\text{эф}} = \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left( \frac{1-K_b}{1+K_b} \right)^n \exp\left(\frac{n^2}{Fo}\right) \right\} b_{п}, \quad (7)$$

$$\text{где } K_b = \frac{b_{\phi}}{b_{п}}; Fo = \frac{a_{п} \tau}{\delta'_{п}{}^2}$$

Твердость была использована для косвенной оценки уровня механических свойств литых сплавов в поверхностной зоне отливок, полученных при кристаллизации на поверхностях, имеющих различный микрорельеф. Математико-статистическая обработка результатов измерения твердости в поверхностной зоне экспериментальных отливок, полученных для различных значений  $K_{\phi}$ , указывают на более высокий уровень механических свойств стали, закристаллизовавшейся на поверхности с микрорельефом, созданным функциональным покрытием (рисунок 10).

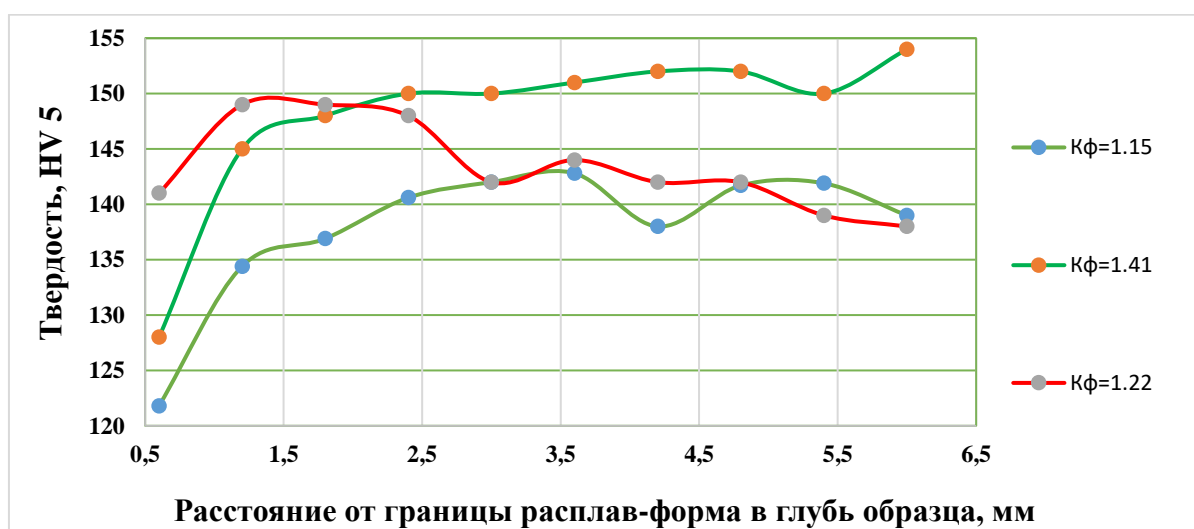


Рисунок 10 – Графики распределения средней твердости в глубину литых образцов

Изучено влияние функционального покрытия на возникновение сил трения на границе «покрытие – отливка». Были проведены расчеты по определению напряжений в затвердевающей корке отливки и прочности покрытия на срез, согласно схеме силового взаимодействия на рисунке 11.

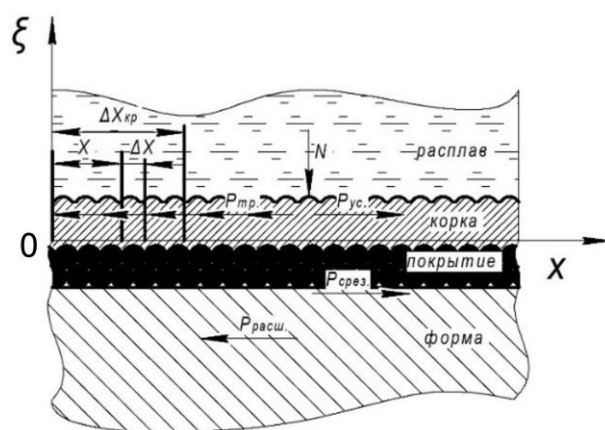


Рисунок 11 – Схема силового взаимодействия при затвердевании в системе «отливка – покрытие – форма/стержень»:  $P_p$  – усилие, возникающее в форме, при ее расширении в результате нагревания;  $P_y$  – сила усаживающейся затвердевающей корки отливки;  $P_{тр}$  – сила трения на границе раздела отливка – покрытие;  $P_{срез}$  – усилие среза на границе покрытие – форма/стержень;  $N$  – нормальное давление взаимодействия отливки и формы

Использование функционального покрытия увеличивает силы трения и на начальном этапе формирования отливки способствует рассредоточению напряжений. На последующем этапе при дальнейшем увеличении усадочных напряжений функциональное покрытие работает на срез по границе «покрытие – форма». при этом должно выполняться условие:

$$P_{тр} > \sigma_m > \sigma_{срез} \quad (8)$$

В результате проведенных исследований выявлен комплексный эффект от работы функционального покрытия по предупреждению образования поверхностных ГТ, заключающийся в следующем: во-первых, микрорельеф, возникающий на поверхности формы в результате применения покрытия приводит к образованию армированного слоя из разнонаправленных кристаллов поверхностной зоны отливки, который увеличивает прочность металла в твердой жидком состоянии, и в процессе затвердевания препятствует образованию поверхностных ГТ; во-вторых, обеспечивается повышение сил трения и рассредоточение напряжений на начальном этапе формирования отливки; в-третьих, на последующем этапе особенности технологии нанесения такого покрытия на форму позволяют при дальнейшем увеличении усадочных напряжений работать на срез функциональному покрытию по границе «покрытие – форма». Комплексное воздействие функционального покрытия в схеме силового взаимодействия «отливка – покрытие – форма» позволяет предотвратить образование поверхностных ГТ в локальных узлах фасонных стальных отливок.

**В пятой главе** представлены результаты апробации и внедрения результатов исследований в литейное производство стальных отливок ответственного назначения.

Разработан технологический способ, основанный на использовании определенного микрорельефа на поверхности песчано-глинистой литейной формы, который при кристаллизации обеспечивает получение упроченного слоя, способного противостоять усадочным напряжениям, что тем самым препятствует возникновению ГТ в стальных отливках ответственного назначения, к которым, в частности



относятся отливки сложной конфигурации, использующиеся в железнодорожном транспорте. В условиях литейного производства были проведены экспериментальные работы по повышению трещиностойкости стальных отливок, путем создания нерегулярного микрорельефа на поверхности рабочей полости ПГЛФ, за счет нанесения функционального покрытия на основе хромитового песка в местах вероятного образования ГТ в отливках.

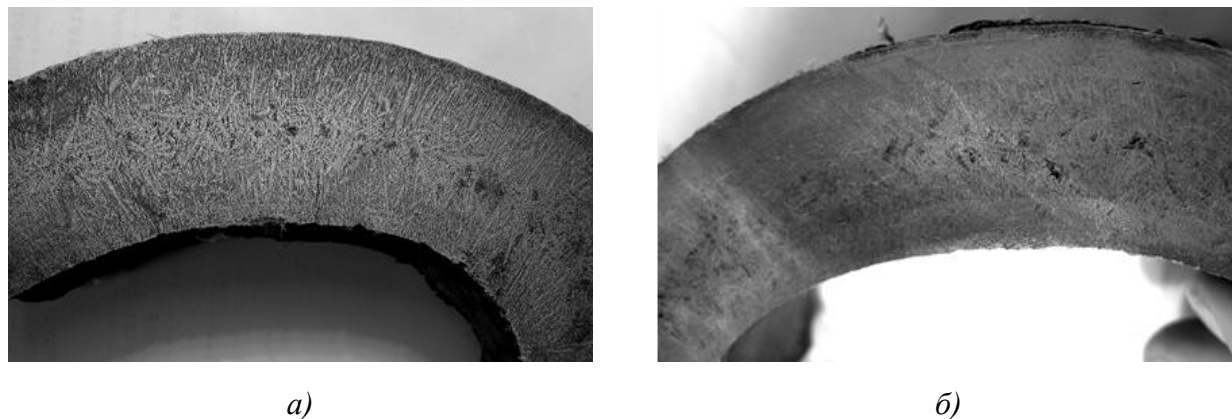


Рисунок 12 – Фотографии макроструктуры образцов в зоне отливки «Рама боковая», R55,  $\times 2$  (травлено): а – обычная технология изготовления без покрытия (элемент отливки с ГТ); б – с использованием функционального покрытия

В критических, с точки зрения образования ГТ, зонах сравнивалась макроструктура стали отливок, изготовленных по обычной (принятой на производстве (рисунок 12, а) и экспериментальным технологиям (рисунок 12, б).

Результаты сравнения значений твердости экспериментальной и контрольной групп отливок с применением непараметрического статистического U- критерия Манна-Уитни приведены в таблице 4. Анализ данных показал, что значение твердости в случае применения экспериментальной технологии изготовления статистически значимо отличаются от значений твердости отливок, произведенных по обычной (принятой на предприятии) технологии, и являются выше.

Таблица 4 – Результаты сравнения элементов выборки значений твердости для контрольной и экспериментальной групп отливок по U – критерию Манна Уитни с доверительной вероятностью  $\alpha = 0,95$

Отливка	Количество элементов в выборках	Максимальная сумма ранга	Расчетное значение	Табличное значение
	$n_1 = n_2 = n_x$	$T_x$	$U$	$U_{кр}$
«Рама боковая»	15	329	16	64
«Корпус автосцепки»		333	12	

В итоге в локальных участках отливки, склонных к образованию ГТ, образуются более плотная мелкодисперсная структура в масштабе макроструктуры и плотная затвердевшая корка в масштабе отливки. Вследствие обеспечения в поверхностном слое отливок упроченной структуры удастся повысить сопротивление растягивающим, усадочным напряжениям и, тем самым, снизить вероятность образования поверхностных ГТ.

Результаты работы внедрены на АО «ПО «Бежицкая сталь» (г. Брянск) при производстве стальных фасонных отливок ответственного назначения с годовым экономическим эффектом 1 млн 737 тыс. рублей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика изучения дефектной зоны и идентификации дефекта ГТ, основанная на применении методов визуального контроля, оптической фрактографии боковой поверхности трещины, при использовании долома участка отливки, содержащего дефект, и анализе макро- и микроструктуры дефектной зоны, позволяющая на основании выявленных характерных признаков (морфологии трещины, степени окисления стали в прилегающей зоне, наличия/отсутствия дендритных паттернов, сопутствующих дефектов усадочного и газового происхождения) классифицировать ГТ в зависимости от механизма их образования на следующие группы: поверхностные усадочные трещины; газовые трещины; газо-усадочные трещины.

2. Уточнен критерий образования горячих трещин RDG, в котором скорость изотермы ликвидуса в зоне роста столбчатых дендритных кристаллов рассчитывается с учетом угла  $\varphi$  между группами соседних дендритов, который образуется при кристаллизации в узлах отливок, имеющих радиальные сопряжения конструктивных элементов. Скорость роста растущего под углом дендрита увеличиваться обратно пропорционально  $\cos\varphi$ , что приводит к уменьшению вторичных междудендритных промежутков дендритов ( $\lambda_{2\perp} > \lambda_{2\angle}$ ), нарушению условия когерентности соседних групп дендритов, что в итоге способствует образованию ГТ в конструктивных узлах отливок, имеющих радиальные сопряжения.

3. Теоретически обосновано комплексное влияние микрорельефа поверхности литейной формы на структуру поверхностной зоны отливки и механизм образования ГТ. Разработана методика расчета формирования поверхностной зоны фасонных стальных отливок в песчано-глинистой форме с функциональным покрытием определенного микрорельефа на основе синтеза решений тепловых и кристаллизационных задач литья, учитывающих начальное распределение температуры расплава после заполнения формы, рельефность покрытия, его смачиваемость, теплообмен последнего с формой, а также условий зарождения и роста кристаллов. Для функционального покрытия на основе хромитового песка с  $K_\phi = 1,41$  становится справедливым равенство  $b_{\phi} = b_{\pi}$  при отношении толщины покрытия к толщине приведенного размера отливки  $\delta_{\pi}/X_m \geq 0,4$ ; для  $K_\phi = 1,22$  при  $\delta_{\pi}/X_m \geq 0,8$ . Дополнительно изучено распределение усадочных напряжений в поверхностной зоне отливки на элементах преднамеренно созданного, посредством функционального покрытия микрорельефа. Доказано, что в первоначальный момент затвердевания отливки функциональное покрытие способствует рассредоточению усадочных напряжений, а в последующем работает на срез, способствуя повышению податливости смеси в потенциально опасной зоне для образования поверхностных ГТ.

4. Изучены основные физико-технологические свойства разработанного функционального покрытия. Методом объемной реконструкции при послойной микроскопии получены значения степени рельефности поверхности литейной

формы  $K_{\phi}$  в зависимости от размера фракции основы покрытия: для фракции 0,2 мм –  $K_{\phi} = 1,22$ ; для фракции 0,4 мм –  $K_{\phi} = 1,41$ . Прочность к истиранию покрытия с  $K_{\phi} = 1,22$  достигает в среднем значения 3,97 кг/мм; с  $K_{\phi} = 1,41$  – 1,94 кг/мм. Осыпаемость покрытия 0,41% и 0,61% соответственно. Прочность на срез  $\sigma_{\text{ср}} = 2,64 \cdot 10^{-7}$  МПа; прочность на сжатие  $\sigma_{\text{сж}} = 6,6 \cdot 10^{-8}$  МПа; прочность на разрыв  $\sigma_{\text{в}} = 6,6 \cdot 10^{-7}$  МПа. Применение функционального покрытия на основе хромитового песка приводит к появлению мелкодисперсной структуры поверхностной зоны отливки (увеличению твердости в литом состоянии на 12% по сравнению с обычной технологией изготовления), которая имеет в 2,5 раза больше количества дендритных осей на единицу поверхности по сравнению с отливкой, изготовленной без покрытия и обеспечивает получение упрочненного структурного слоя от 3 до 6 мм для приведенного размера стенки отливки от 20 до 7,5 мм соответственно.

5. Разработан технологический способ, заключающийся в создании микрорельефа на рабочей полости песчано-глинистой литейной формы, в результате нанесения функционального покрытия на основе хромитового песка определенной фракции, который приводит к формированию армированного слоя из мелкодисперсных разнонаправленных кристаллов в поверхностной зоне отливки и препятствует образованию поверхностных ГТ. Получен патент на изобретение РФ. Результаты работы внедрены на АО «ПО «Бежицкая сталь» (г. Брянск) при производстве фасонных стальных отливок ответственного назначения с годовым экономическим эффектом 1 млн 737 тыс. рублей.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ РАБОТ

### Публикации в изданиях из перечня ВАК

1. Макаренко, К.В. Механические аспекты образования в отливках горячих трещин/К.В. Макаренко, С.С. Кузовов, О.А. Лесюнина // Литейное производство. – 2013. — № 2. – С. 5 – 8.
2. **Кузовов, С.С.** Особенности образования горячих трещин в условиях непостоянства температуры заливки стальных отливок / С.С. Кузовов, К.В. Макаренко, Д.А. Илюшкин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. — № 3. – С. 38 – 41.
3. Макаренко, К. В. Использование критерия Ниямы для прогнозирования мест образования трещин в отливках / К.В. Макаренко, С.С. Кузовов // Литейщик России. – 2015 г. – № 1 – С. 18–22.
4. Макаренко, К.В. Структурные исследования дефекта «горячая трещина» / К.В. Макаренко, С.С. Кузовов, М.А. Шумаков, В.Н. Антохин // Литейное производство. – 2016. — №7. – С. 6 – 9.
5. **Кузовов, С.С.** Методика исследования дефектов типа «горячая трещина» / С.С. Кузовов, К.В. Макаренко, Н.А. Жижкина // Известия вузов. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59. - №11. – С. 799 – 805.
6. Макаренко, К. В. Влияние фактора растворенных в металле газов на морфологию горячих трещин в стальных отливках / К.В. Макаренко, С.С. Кузовов, А.В. Пушкарев, В.Н. Антохин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. — №12. – С. 3 – 8.

7. Макаренко, К.В. Влияние структуры металла на механизм образования горячих трещин в отливках из стали 20ГЛ / К.В. Макаренко, **С.С. Кузовов** // Литейное производство. – 2016. – №12. – С. 6 – 10.
8. **Кузовов, С.С.** Повышение трещиностойчивости стальных отливок путем нанесения функционального покрытия на рабочую полость литейной формы / **С.С. Кузовов**, К.В. Макаренко // Литейное производство. – 2017. — №4. – С. 13 – 17.
9. **Кузовов, С.С.** Анализ влияния химического состава стали на образование горячих трещин в отливках / **С.С. Кузовов**, К.В. Макаренко, Н.В. Дмитриева // Литейное производство. – 2018. – №2. – С. 17 – 19.
10. **Кузовов, С.С.** Исследование теплопередачи в системе «расплав-функциональное покрытие-литейная форма» с использованием в основе покрытия хромита / **С.С. Кузовов**, К.В. Макаренко // Огнеупоры и техническая керамика. – 2020. – № 9. – С. 3-7.
11. Макаренко, К. В. О влиянии силового взаимодействия в системе покрытие-отливка-форма/стержень на образование горячих трещин / К.В. Макаренко, **С.С. Кузовов** // Литейное производство. – 2021. — №3. – С. 24 – 27.

#### **Публикации в научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных ВАК**

12. Влияние микрогеометрии поверхности рабочей полости литейной формы на трещиностойчивость стали / К.В. Макаренко, **С.С. Кузовов**, Д.В. Чмыхов, Д. А. Илюшкин, С.В. Денисихин // Технология металлов. – 2018. - №1. – С. 11 – 18.
13. Макаренко, К.В. Исследование влияния микрорельефа поверхности рабочей полости литейной формы на формирование структуры в поверхностном слое стальных отливок / К.В. Макаренко, **С.С. Кузовов**, Н.В. Дмитриева // Технология металлов. – 2018. - №8. – С.20 – 24.

#### **Статьи в зарубежных научных изданиях**

14. Zhizhkina, N. A. The development of non-destructive quality control of massive castings / N.A. Zhizhkina, **S.S. Kuzovov** // Metallurgical and Mining Industry.- 2016. - No.9.- P. 28 – 33.
15. Makarenko K.V. Visualization of the Phase Volume Distribution in Alloys / K.V. Makarenko, S.S. Kuzovov, A.A. Nikitin // Proceedings of the 29th International Conference on Computer Graphics and Vision /Bryansk, Russia, Vol-2485 September 23-26, 2019. – P. 236-239.

#### **Патенты**

16. Пат. 2579329 РФ, МПК В22D 27/20. Способ измельчения зерна стали в поверхностном слое отливки / Макаренко К.В., **Кузовов С.С.**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» (RU). - № 2014143374/02; заявл. 27.10.2014; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10.

#### **Научные статьи, опубликованные в материалах международных, всероссийских и межрегиональных конференций**

17. Макаренко, К.В. Влияние дефектов группы «несплошностей» на механизм образования горячих трещин в стальных отливках [Текст] / К.В. Макаренко, **С.С. Кузовов** // Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве:

материалы II Международной заочной конференции / отв. ред. А. А. Веселовский. – Орск, - 2013. – С. 141-144.

18. Макаренко, К.В. Оценка взаимосвязи между местами образования горячих трещин в стальных отливках и сопутствующими литейными дефектами [Текст] / К.В. Макаренко, **С.С. Кузовов** // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых – 2013 [Текст]: материалы Международной молодежной научной конференции / отв. ред. А. А. Горохов. – Курск:, 2013. – С. 182 – 185

19. **Кузовов, С.С.** Исследование причин образования горячих трещин в отливках [Текст] / **С.С. Кузовов** // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Гомель, 2015 – С. 20 – 24.

20. **Кузовов, С.С.** Разработка новых механизмов управления процессами кристаллизации для ликвидации дефектов «горячая трещина» [Текст] / **С.С. Кузовов**, К.В. Макаренко // Труды XII Съезда литейщиков России / НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2015 – С. 112 – 114.

21. **Кузовов, С.С.** Исследование факторов приводящих к образованию горячих трещин в стали 20ГЛ [Текст] / С. С. Кузовов // Проблемы обеспечения и повышения качества и конкурентоспособности изделий машиностроения и авиадвигателестроения (ТМ-2015): материалы 7 – й Международной научно-технической конференции / Брянск: БГТУ, 2015 – С. 90 – 91.

22. **Кузовов, С.С.** Новый способ уменьшения горячих трещин в стальных отливках [Текст] / **С.С. Кузовов**, К.В. Макаренко // Труды VIII Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» / Москва: МИСиС, 2015. – С. 245 – 248.

23. Макаренко, К.В. Влияние температуры заливки на вероятность образования горячих трещин в стальных низколегированных отливках / К. В. Макаренко, **С.С. Кузовов** // Современные материалы, техника и технологии. – 2015. — №1. – С. 134 – 138.

24. Макаренко, К.В. Влияние структуры металла на механизм образования горячих трещин в отливках из стали 20ГЛ [Текст] / К.В. Макаренко, **С.С. Кузовов** // Труды 11 - й Международной научно-практической конференции, посвященной 120-летию со дня рождения профессора Наума Григорьевича Гиршовича, «Литейное производство сегодня и завтра» / Ассоциация литейщиков Санкт-Петербурга и Ленинградской области (ЛенАл). – СПб, 2016 – С. 146 – 160.

25. Макаренко, К.В. Материаловедческие аспекты образования горячих трещин в стальных отливках железнодорожного транспорта / К.В. Макаренко, **С.С. Кузовов** // Материалы международной научно-технической конференции «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники», 19-20 февраля 2020 г. – Брянск: БГТУ, 2020. – С. 15 – 19.

26. Кузовов, С.С. Влияние угла разориентировки дендритов на образование горячих трещин в фасонных отливках / **С.С. Кузовов**, К.В. Макаренко // Труды X Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» / Москва: МИСиС, 2020. – С. 28 – 33.