

На правах рукописи



**ЛАРИОНОВА Наталья Вячеславовна**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО КОКИЛЬНОГО ЛИТЬЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ОТЛИВОК ИЗ  
ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ**

Специальность 05.16.04 – Литейное производство

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет» г. Красноярск.

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент  
**Токмин Александр Михайлович.**

**Официальные оппоненты:**

**Евстигнеев Алексей Иванович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», Управление научно-исследовательской деятельностью, профессор - консультант.

**Еремин Евгений Николаевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», кафедра «Машиностроение и материаловедение», заведующий.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк.

Защита состоится 19 марта 2020 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.10 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет» по адресу 660025, г. Красноярск, пр. «Красноярский рабочий», д. 95, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет» и на сайте <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.099.10



**Лесив Елена Михайловна**

### **Актуальность.**

Повышение качества выпускаемой продукции, а также возможность вовлечения во вторичную переработку инструментальных сталей на предприятиях по производству изделий с использованием кузнечнопрессового оборудования может быть реализовано за счет применения литейных технологий. Стойкость прессового и штампового инструментов определяется химическим составом, стабильностью структуры и свойствами материала в процессе эксплуатации. Получение отливок с высоким комплексом эксплуатационных свойств, которые в дальнейшем возможно использовать для изготовления инструмента, является одной из важных задач литейного производства. Однако применение литых инструментов ограничено из-за пониженных механических свойств и прежде всего ударной вязкости по сравнению с горячедеформированными сталями. Основными причинами снижения механических свойств является: неоднородная структура, наличие грубых неметаллических включений и значительная ликвация литого металла.

Применение электрошлакового кокильного литья (ЭКЛ), созданного в Институте электросварки им. Е.О. Патона, позволяет получать литые изделия с достаточно высоким комплексом физико-механических свойств. Технология ЭКЛ является не только ресурсосберегающей, но и обеспечивающей эффективное рафинирование переплавляемого металла и возможность реализации направленной кристаллизации отливок. Использование различных способов воздействия в технологическом процессе, таких как модифицирование, управление температурным полем при охлаждении является существенным резервом в повышении эксплуатационных свойств отливок, позволяющим снизить отрицательное влияние неметаллических включений, уменьшить ликвацию, получить заданную структуру и ее дисперсность.

**Степень разработанности темы.** Исследованию природы неметаллических включений, их морфологии, размеров, расположения в металле посвящены работы авторов: В.И. Явойского, С.И. Губенко, К.В. Григорович, М.А Штремель, К. Нарита и др.

Существенный вклад в разработку теории и технологии получения отливок с высокими показателями прочности, надежности и долговечности в условиях значительного термосилового воздействия при электрошлаковом литье внесли Б.Е. Патон, Б.И. Медовар, Е.Н. Еремин и др.

В то же время вышедшие из строя инструменты, отходы проката являются значительными потерями на предприятиях и вовлечение их во вторичную переработку перспективно и экономически выгодно. Однако при использовании традиционных технологий для переработки отходов наблюдаются дефекты: значительная ликвация, неоднородная структура, транскристаллитная кристаллизация и др.

Перспективным направлением в решении данной проблемы является применение модифицирования и регулирование теплоотвода для управления структурой и свойствами литого электрошлакового металла, позволяющие

получать отливки с повышенными показателями эксплуатационных свойств. Однако влияние такого воздействия при использовании мишметалла применительно к отливкам инструментальных сталей мало изучено.

**Цель исследования.** Повышение свойств отливок из инструментальной стали за счет совершенствования технологических процессов электрошлакового кокильного литья, применения редкоземельных металлов для модифицирования и рафинирования литого металла.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи:**

1. Исследовать механизм модифицирования и рафинирования стали 4X5МФС, полученной ЭКЛ, редкоземельными металлами в составе мишметалла, вводимыми в расплав.

2. Оценить степень влияния размеров и количественного соотношения неметаллических включений на механические свойства отливок из инструментальной стали.

3. Установить влияние параметров технологии ЭКЛ на структуру и механические свойства отливок исследуемой стали на основе компьютерной модели процесса охлаждения кокиля с металлом.

4. Усовершенствовать процесс получения отливок из стали 4X5МФС, методом электрошлакового литья, с требуемыми структурами и физико-механическими свойствами.

5. Провести опытно-промышленные испытания отливок.

**Научная новизна работы:**

1. Показана эффективность применения редкоземельных металлов в составе мишметалла в количестве 0,15–0,2 мас. % для повышения качества инструментальной стали после предварительного глубокого раскисления алюминием, что способствовало последующей дополнительной дефосфорации и десульфурации металла в среднем на 30 %, снижения общего количества неметаллических включений в 3 раза, изменения их природы, глобулизации, размерного соотношения и распределения.

2. Установлено, что редкоземельные элементы, не связанные с кислородом и серой, при затвердевании отливок из стали 4X5МФС локализуются на поверхности растущей твердой фазы, что приводит к измельчению структуры и повышению прочности в 1,2 раза, ударной вязкости в 1,5 раза.

3. Определены температурные поля отливок при кристаллизации на основании результатов компьютерного моделирования, что позволило дополнительно повысить механические свойства на 10 % за счет применения кокиля с управляемым теплоотводом.

4. Установлена взаимосвязь между механическими свойствами легированной стали, общим содержанием и размерами неметаллических включений.

**Практическая значимость работы:**

1. Предложено технологическое решение по увеличению эксплуатационных свойств отливок из стали 4X5MФС за счет введения в расплав редкоземельных металлов в составе мишметалла (Решение о выдаче патента по заявке на изобретение № 2019109629 от 09.12.2019).

2. Усовершенствован процесс электрошлакового кокильного литья для получения отливок из легированной стали с заданными структурами и повышенными механическими свойствами за счет формирования направленного теплоотода в процессе кристаллизации.

3. Разработано программное обеспечение и предложены практические рекомендации по определению влияния неметаллических включений на механические свойства получаемой отливки (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017615806).

4. Получены отливки по предложенной технологии, из которых были изготовлены матрицы для прессования, прошедшие промышленные испытания на ООО «КраМЗ».

5. Результаты проведенных исследований внедрены в учебный процесс в ФГАОУВО «Сибирский федеральный университет» и используются при обучении магистрантов по направлению подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии обработки материалов», образовательной программы 22.04.01.04 «Синтез и литье новых металлических материалов».

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Анализ термодинамического расчета десульфурации, дефосфорации легированной стали в результате ее двухстадийной обработки при электрошлаковом кокильном литье.

2. Результаты экспериментальных исследований влияния редкоземельных металлов при введении их в легированную сталь на морфологию неметаллических включений, на структуру и свойства.

3. Результаты компьютерного моделирования, позволяющие оценить метод управления конфигурацией тепловых процессов при электрошлаковом кокильном литье.

4. Способы усовершенствования технологического процесса направленные на улучшение структуры и повышение свойств отливок из инструментальной стали, полученной электрошлаковым кокильным литьем.

**Методология и методы исследования** основаны на большом объеме экспериментальных данных образцов литого металла, полученного электрошлаковым кокильным литьем и обработанных с использованием методов математической и компьютерной статистики, а также апробированных и аттестованных методик. Результаты прогнозов, сделанных в работе, подтверждены при определении механических свойств и промышленных испытаний.

**Личный вклад автора** заключается в определении цели и постановке задач данного исследования, планировании экспериментов, разработке положений, определяющих научную новизну, теоретическую и практическую значимость, получении и проведении исследований, научном обосновании полученных результатов, формулировке выводов и заключения для принятия решений.

**Достоверность** полученных результатов, выводов обеспечивается необходимым объемом экспериментальных исследований и основаны на использовании научно-обоснованных методов исследований и обработки результатов, компьютерного моделирования, опытно-промышленных исследований, статистической обработки результатов.

**Соответствие диссертационной работы паспорту специальности 15.16.04 – «Литейное производство».** Содержание работы выполнено в соответствии со следующими разделами паспорта специальности:

Формула специальности: теория и технология производства литых заготовок и изделий из металлических сплавов и других материалов; изучение процессов, происходящих в расплавах во время их плавки, заливки в литейную форму, кристаллизации и последующего охлаждения в форме.

Области исследований: п. 1. Исследование физических, физико-химических, теплофизических, технологических и служебных свойств материалов как объектов и средств реализаций литейных технологий; п. 6. Разработка методов моделирования процессов заливки, затвердевания и охлаждения литых заготовок; п. 11. Ресурсосбережение в литейном производстве; п. 12. Исследование проблем качества литья.

**Апробация результатов работы** Основные положения диссертационной работы обсуждались на следующих научно-технических конференциях: X Международный конгресс «Цветные металлы и минералы» (Красноярск, 2018 г.), IX Международный конгресс «Цветные металлы и минералы» (Красноярск, 2017 г.), Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г.Горшкова (Ярополец 2010–2017 г.г.), XIV Международная научная конференция «Памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева» (Красноярск, 2010 г.).

**Публикации.** Результаты диссертационной работы отражены в 15 научных трудах, из них: в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК–5, в сборниках материалов научных трудов и научных конференций – 8, патентах Российской Федерации на изобретения – 2.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, содержащего 136 источников, и 3 приложений. Содержит 129 страниц основного текста, включая 11 таблиц и 38 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность темы диссертационного исследования, поставлена цель и определены задачи. Сформулированы научная новизна и основные положения, выносимые на защиту, а также показана практическая значимость результатов работы.

**В первой главе** приведен анализ способов воздействия на жидкий металл с целью получения дисперсной ориентированной структуры, уменьшения в стали содержания вредных примесей и неметаллических включений.

Анализ применяемых способов, позволил определить преимущества и недостатки электрошлаковых технологий. Отмечено, что в электрошлаковых отливках встречаются различные дефекты и несовершенства, в том числе неметаллические включения.

Комплексное воздействие при кристаллизации отливок с применением электрошлаковых технологий позволяет влиять на их структуру, регулировать состав, количество и распределение неметаллических включений, что способствует повышению свойств стали.

На основании проведенного анализа поставлены цель и задачи диссертационного исследования.

**Во второй главе** рассмотрено экспериментальное оборудование, технология и методика получения отливок из стали 4Х5МФС, технология их термической обработки, приведена методика экспериментальных исследований и научное оборудование.

Получение отливок из инструментальной стали 4Х5МФС осуществлялось при переплаве электродов на экспериментальной установке с использованием флюса АНФ-295. Отливки, полученные ЭКЛ, имели форму дисков диаметром 200 и толщиной 80 – 100 мм. Осуществлен выбор применяемых модификаторов, с целью получения образцов с пониженным содержанием неметаллических включений.

Исследование границы раздела, химического и фазового состава, механических и эксплуатационных свойств отливок из стали 4Х5МФС, проводилось с применением следующих методик и научного оборудования:

- металлографические – методом оптической микроскопии с использованием светового микроскопа Carl Zeiss Axio Vision, оснащенного устройством визуализации изображения, электронной микроскопии с применением растровых электронных микроскопов HITACHI TM-1000;
- энергодисперсионный и химический анализ – в растровом электронном микроскопе JEOL JSM 7001F, оснащенный энергодисперсионным спектрометром фирмы Oxford Instruments;
- рентгенофазовые исследования – на дифрактометре D8-ADVANCE;

– анализ предела прочности на растяжение, предела текучести, относительного удлинения, относительного сужения – на испытательной машине ZDM-10 в соответствии с ГОСТ 1497–84;

– анализ твердости – на приборе ТК-2М по методу Роквелла в соответствии с ГОСТ 2999–75, на приборе типа ТБ 5004 по методу Бринелля согласно ГОСТ 9012–59;

– анализ микротвердости на приборе ПМТ-3М в соответствии с ГОСТ 9450–76.

**В третьей главе** представлены теоретические и экспериментальные исследования влияния редкоземельных металлов на модифицирование и рафинирование отливок из инструментальной стали 4Х5МФС (мартенситного класса), полученных электрошлаковым кокильным литьем.

Химический состав отливок из инструментальной стали по основным легирующим элементам и углероду по отношению к переплавляемым электродам практически не изменяется. Наблюдается существенное снижение содержания серы до 0,006 %, фосфора – до 0,015 %.

В отливках, полученных ЭКЛ, из-за создания направленного теплового поля формируется структура с определенной ориентацией. В результате ликвационных процессов, которые развиваются в легированных сталях, из-за наличия элементов с малым коэффициентом распределения ( $k_D < 1$ ), формируется структура, представляющая собой ориентированные кристаллы и междендритные прослойки. Междендритные участки имеют разветвленное строение, и размеры этих прослоек определяются величиной дендритов. Ликвация в этих участках приводит к формированию крупных пленочных включений (рисунок 1), снижающих механические свойства, особенно ударную вязкость.

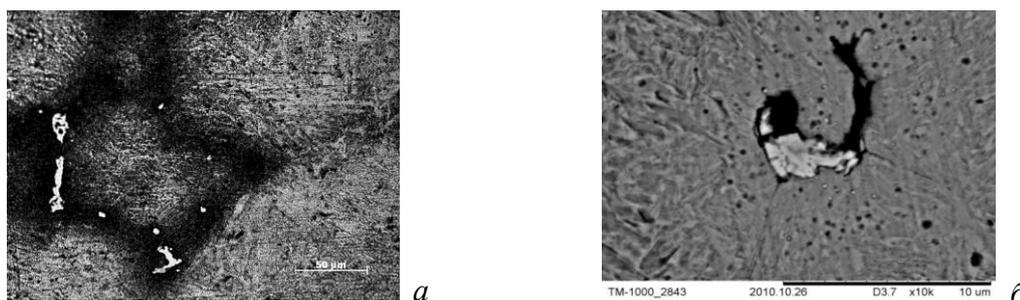
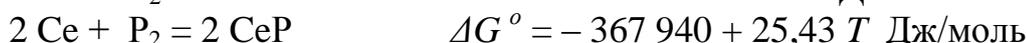


Рисунок 1 – Микроструктура отливки из стали 4Х5МФС до модифицирования:  
*а* – общий вид,  $\times 100$ , *б* – неметаллическое включение

Модифицирование значительно влияет на структуру кристаллизующегося металла и на его свойства. На основании предварительных исследований было выбрано модифицирование и рафинирование легированной стали редкоземельными металлами в составе

мишметалла (ТУ 48–4–280–91) с целью изменения структуры и повышения свойств.

Для анализа процессов десульфурации и дефосфорации инструментальной стали при введении редкоземельных металлов были использованы расчетные значения энергии Гиббса соответствующих реакций. Ввиду того, что редкоземельные металлы ведут себя практически одинаково при реакции с кислородом, серой, фосфором, рассматривалось взаимодействие церия с этими химическими элементами.



Значения энергии Гиббса применялись для расчета значений констант равновесия  $\lg K$  соответствующих реакций при температурах 1580–1600 °С.

Полученные термодинамические данные использовались для построения графиков зависимости  $\Delta G^{\circ} = f(T)$ ,  $\lg K = f(T)$  (рисунок 2). При введении в жидкий металл модификатора мишметалла цериевой группы появляются тугоплавкие соединения. РЗМ имеют большее сродство к химическим элементам, присутствующим в жидком металле, в частности кислороду, сере и др.

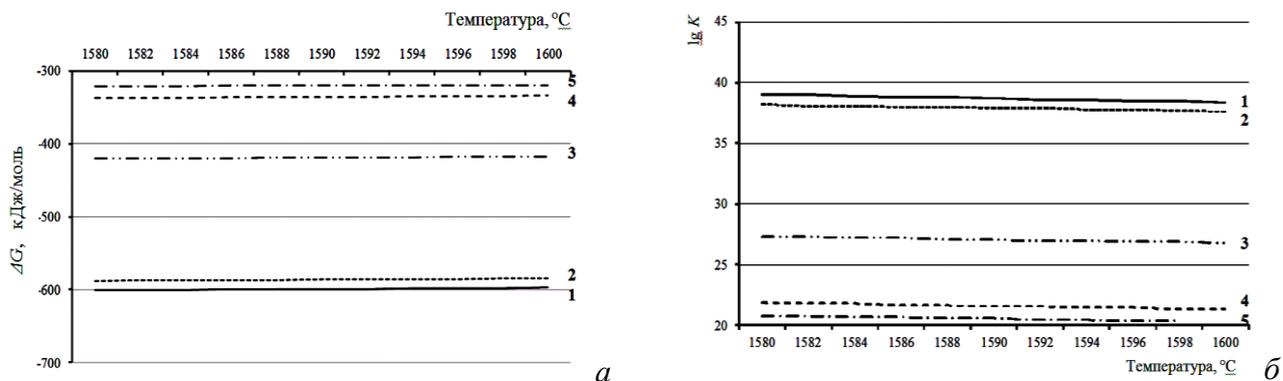


Рисунок 2 – Графики температурной зависимости: а – энергии Гиббса,  $\Delta G$ ; б – константы равновесия,  $\lg K$

Анализ приведенных зависимостей показывает возможность образования окислов при взаимодействии РЗМ с кислородом, растворенным в стали, а затем образование сульфидов при реагировании их с серой, окисульфидов и фосфидов РЗМ. Эти соединения не смачиваются жидкой сталью, склонны к укрупнению неметаллических включений в результате их возможного столкновения и образованию конгломератов. Учитывая закон Стокса, происходит увеличение скорости всплывания этих твердых частиц, в небольшую прибыльную часть отливки, которая находится под слоем шлака, тем самым сталь очищается от газов и неметаллических включений.

Модифицирование редкоземельными металлами в составе мишметалла способствует формированию более однородной структуры, измельчению зерна (рисунок 3, *а*) и переводу грубых пленочных включений (рисунок 3, *б*) в глобулярные образования, что способствует повышению механических свойств.

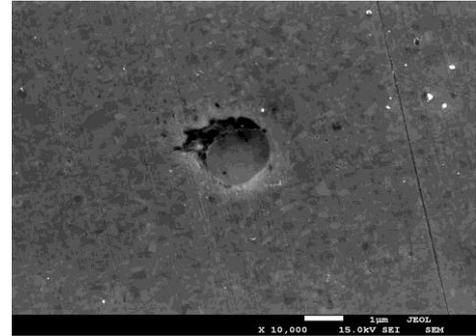
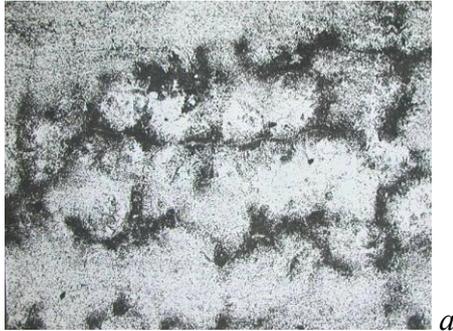


Рисунок 3 – Микроструктура отливки из модифицированной стали 4X5MFC:  
*а* – общий вид, х 100, *б* – неметаллическое включение

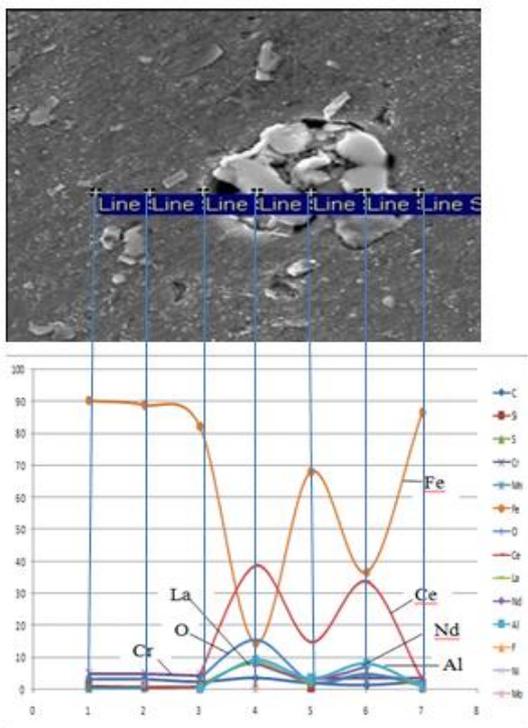


Рисунок 4 – Глобулярное окисьюльфидное включение: *а* – общий вид;  
*б* – концентрационное распределение элементов после модифицирования мишметаллом

Значительный интерес представляют неметаллические включения сферической формы (рисунок 4). Как показали результаты энергодисперсионного анализа, они могут быть идентифицированы как окисьюльфидные включения, которые содержат значительное количество элементов, входящих в состав мишметалла – Ce, Nd, La. Причем эти элементы не располагаются по границам включения.

Следует отметить, что присутствие этих модификаторов в значительной степени способствуют процессу коагуляции, это связано с увеличением коэффициента коагуляции – *т*. Для подтверждения этого предположения были проведены исследования по определению неметаллических включений в отливках ЭКЛ без модифицирования и модифицированные мишметаллом

в количестве 0,15–0,2 мас. %. Все отливки перед модифицированием были раскислены алюминием в количестве 0,15 – 0,2 мас. %. Изучение и оценка

неметаллических включений проводилась на оптическом микроскопе на нетравленных микрошлифах при увеличениях  $\times 500$  и  $\times 800$ .

Просматривалось не менее 15 полей зрения на каждом микрошлифе.

Загрязненность образца НВ определялась по формуле

$$Q = \Sigma S_{\text{вкл}} / S_{\text{пол. зрения}},$$

где  $S_{\text{вкл}}$  – площадь неметаллического включения,  $\text{мкм}^2$ ;  $S_{\text{пол. зрения}}$  – площадь поля зрения,  $\text{мкм}^2$ .

Средний размер включения рассчитывали по формуле

$$D = \Sigma d_{\text{вкл}} / N_{\text{вкл}},$$

где  $d_{\text{вкл}}$  – диаметр неметаллического включения,  $\text{мкм}$ ;  $N_{\text{вкл}}$  – количество неметаллических включений.

Можно наблюдать, что в образцах 1–5, полученных по обычной технологии, общая загрязненность НВ в 2–3 раза превышает загрязненность образцов № 6–10, при получении которых применялось модифицирование мишметаллом (таблица 1). Как видно из таблицы 1, модифицирование приводит не только к уменьшению общего количества НВ, но и к значительному изменению их размерного соотношения.

Таблица 1 – Количество и форма неметаллических включений в отливках стали 4Х5МФС

Способ обработки	№ образца	Средний диаметр включений округлой формы, $\text{мкм}$	Средний размер включений прямоугольной формы, $\text{мкм}$	Количество неметаллических включений, %		Общее количество неметаллических включений, %
				сульфиды и окисульфиды	нитриды	
До модифицирования	1	3,9	2,7	5,4	1,1	6,6
	2	4,2	2,1	8,4	0,9	9,3
	3	4,1	1,4	6,2	0,8	7,4
	4	3,04	1,3	4,6	2,2	6,8
	5	4,6	2,8	6,5	1,7	8,2
После модифицирования	6	4,0	1,5	2,8	0,7	3,5
	7	2,78	1,1	1,7	0,4	2,1
	8	3,24	1,1	1,2	0,4	1,6
	9	3,46	1,1	2,4	0,9	3,3
	10	2,14	1,18	2,0	0,9	2,9

После модифицирования в отливках существенно сокращается доля крупных НВ, в частности количество включений, размеры которых

превышают 5 мкм, при этом суммарное количество средних и мелких включений также несколько уменьшается (рисунок 5).

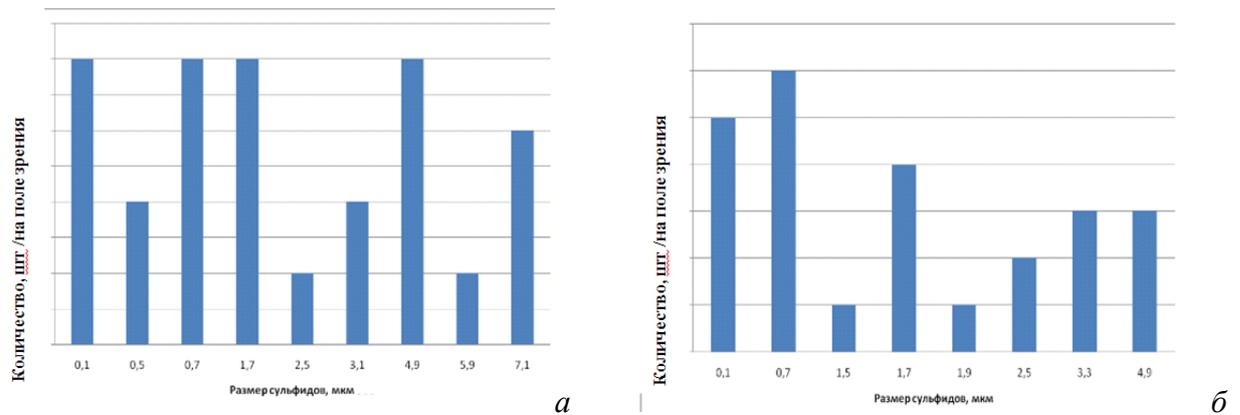


Рисунок 5 – Количественное и размерное соотношение неметаллических включений:  
*а* – до модифицирования; *б* – после модифицирования.

РЗМ являются поверхностно-активными модификаторами, тем самым происходит разрушение дендритной структуры, а также уменьшение размеров первичного и вторичного зерна. Эффект измельчения от добавок мишметалла связан с локализацией редкоземельных элементов на поверхности растущей твердой фазы, обусловленной поверхностной активностью.

При модифицировании легированной стали мишметаллом часть РЗМ участвует в процессе рафинирования расплава, наблюдается его дополнительная десульфурация и дефосфорация, при этом содержание серы снижается до 0,004 %, фосфора до 0,01 %, а часть – в процессе модифицирования.

Рафинирование и модифицирование легированной стали редкоземельными металлами оказывает значительное влияние на повышение ее механических свойств. Ударная вязкость отливок из легированной стали до модифицирования составляла 0,16 – 0,22 МДж/м<sup>2</sup>, после модифицирования – 0,3 – 0,35 МДж/м<sup>2</sup>, а предел прочности на растяжение увеличился от 1320 МПа до 1600 МПа

В ходе экспериментальных исследований были получены данные, характеризующие взаимосвязь между общим содержанием неметаллических включений и следующими параметрами: пределом прочности на растяжение, пределом текучести, ударной вязкостью (таблица 2). Для определения функциональных зависимостей между этими величинами был использован метод регрессионного анализа. Результаты расчетов находятся в соответствии с экспериментальными данными.

Таблица 2 – Зависимость механических свойств от общего содержания неметаллических включений

Параметр $y$	Общее количество неметаллических включений в образцах $x$ , %									
	После модифицирования					До модифицирования				
	1,6	2,1	2,9	3,3	3,5	6,6	6,8	7,4	8,2	9,3
Предел прочности на растяжение $\sigma_b$ , $10^{-1}$ МПа	157,69	162,88	164,2	155,78	163,91	130,8	129,0	129,4	139,3	132,6
Предел текучести $\sigma_m$ , $10^{-1}$ МПа	131,99	131,98	141,24	135,65	142,63	109,4	107,7	109,1	124,2	113,8
Ударная вязкость $KCU$ , МДж/м <sup>2</sup>	0,29	0,33	0,32	0,3	0,28	0,16	0,17	0,18	0,22	0,2

Определяя с помощью нелинейной регрессии зависимости предела прочности на растяжение  $\sigma_b$ , предела текучести  $\sigma_m$ , ударной вязкости  $KCU$  от общего содержания неметаллических включений в металле (функцию  $y(x)$ ), интерпретируем значения параметров, представленных в таблице 2, как значения случайных величин  $x$  и  $y$ , которые имеют некоторое совместное распределение вероятностей.

Построены графики регрессии для предела прочности на растяжение  $\sigma_b$  (рисунок 6, а), предела текучести  $\sigma_m$  (рисунок 6, б), ударной вязкости  $KCU$  (рисунок 6, в), где точками изображены данные, полученные в результате эксперимента, сплошная линия – линия регрессии, определяющая функциональную зависимость  $y(x)$ . Определено, что при увеличении размеров неметаллических включений свойства отливок значительно снижаются.

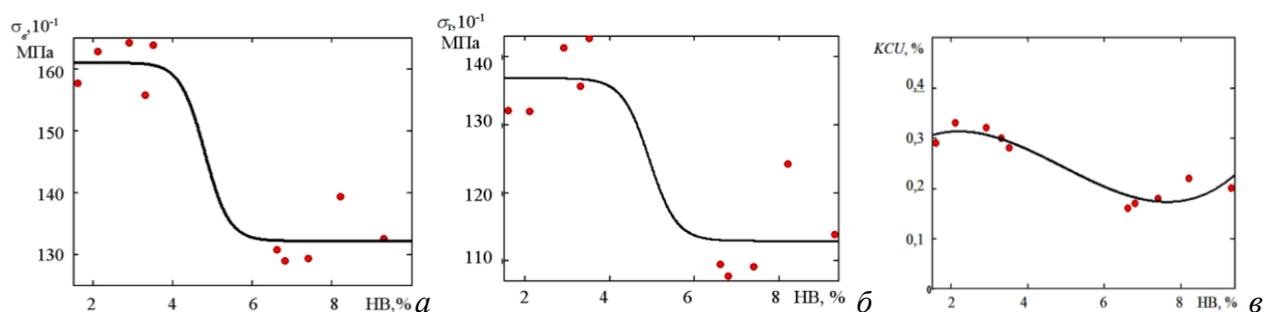


Рисунок 6 – График регрессии: а...в – для  $\sigma_b$ ,  $\sigma_m$  и  $KCU$ , соответственно

Для проведения исследований комплексного воздействия в условиях электрошлакового кокильного литья были получены отливки по следующим

технологиям: ЭКЛ – 1, с использованием модификатора – 2, с использованием модификатора и кокиля с регулируемым теплоотводом в процессе кристаллизации отливки – 3, с использованием модификатора и отсечки шлака при заливки в кокиль – 4.

Отливки, полученные по обычной технологии, имеют четко выраженное различие микроструктуры по сечению, а в верхней части наблюдается несплошность и большое количество газоусадочных пор. В отливках, изготовленных с применением модификатора, микроструктура дисперсная и однородная по всему сечению. Однако в верхней части наблюдаются дефекты газоусадочного происхождения. У отливок, при получении которых применялись модификаторы и кокиль с принудительным охлаждением донной части, дисперсная и однородная структуры. Верхняя часть имеет практически плоский вид и небольшое количество дефектов, которые сосредоточены в приповерхностной зоне. У отливок, полученных с применением модифицирования и отсечки шлака, дисперсное строение, однако в них образуется четко выраженная усадочная раковина. Механические свойства отливок представлены в таблице 3. Повышение прочности не приводит к снижению пластичности, а ударная вязкость достигает максимальных значений для третьей технологии.

Таблица 3 – Механические свойства образцов отливок, полученных с применением разных технологий

№ технологии	Предел, МПа		Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %	Ударная вязкость $KCU$ , МДж/м <sup>2</sup>
	прочности на растяжение $\sigma_b$	текучности $\sigma_T$			
1	1 327	1 139	5,9	10,4	0,17
2	1 598	1 367	9,2	27,2	0,30
3	1 661	1 374	9,6	26,9	0,33
4	1 632	1 369	9,3	26,3	0,29

Таким образом, при обработке стали редкоземельными металлами в составе мишметалла обеспечивается десульфурация и дефосфорация расплава, измельчение микроструктуры, уменьшение количества неметаллических включений, изменение их природы, распределения, размерного соотношения, глобулизации, увеличение механических свойств.

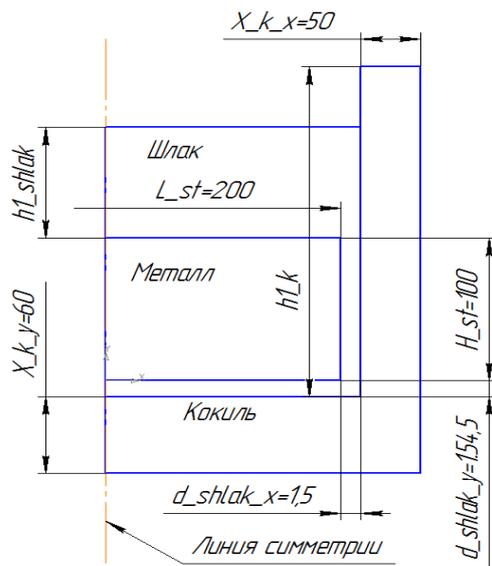


Рисунок 7 – Расчетная схема кристаллизующей отливки

В четвертой главе представлено исследование температурных полей в процессе охлаждения кокиля и находящегося в нем металла с помощью программы конечно-элементного анализа ANSYS 11.0.

Объектом моделирования является отливка цилиндрической формы из легированной стали 4X5МФС, получаемая литьем в кокиль (рисунок 7). Построение моделей распределения температуры в отливке и кокиле выполнялось при толщине гарнисажа – 1,5 мм, диаметре отливки – 200 мм; высоте отливки – 100 мм для трех случаев: 1 – толщина донной части 120 мм, при толщине верхнего шлакового слоя 60 мм; 2 – то же с принудительным охлаждением донной части и 3 – толщина донной части 60 мм, при толщине верхнего шлакового слоя 20 мм.

Задавались начальные условия: температура заливки жидкого металла 1 560 °С, температура окружающей среды 20 °С, коэффициенты теплоотдачи металл–воздух 10 Вт/м<sup>2</sup> К, шлак–воздух 3,8 Вт/м<sup>2</sup> К. Для расчета использовались данные: коэффициент теплопроводности расплавленного металла 27 Вт/м град, шлака 1,16 Вт/м град, плотность металла и шлака 7 495 кг/м<sup>3</sup> и 2 800 кг/м<sup>3</sup> соответственно. Перенос тепла осуществлялся через стенки кокиля, покрытые слоем гарнисажа. Скорость охлаждения отливки

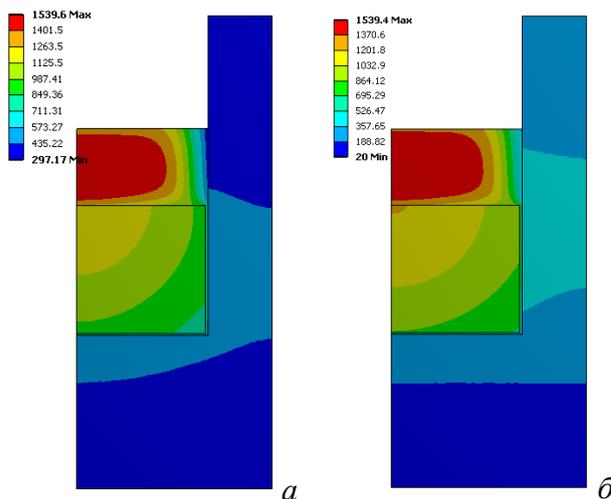


Рисунок 8 – Модель распределения температурных полей спустя 1080 с после заливки расплавленного металла в форму: а – без охлаждения; б – с принудительным охлаждением донной части

изменялась в зависимости от изменения геометрических размеров кокиля, толщины шлаковой надставки, а также дополнительным охлаждением донной части кокиля.

Значительные различия в конфигурации и расположении температурных зон наблюдаются в моделях распределения температуры металла, шлака и кокиля при толщине верхнего шлакового слоя 60 мм и донной части 120 мм без охлаждения и с принудительным охлаждением донной части (рисунок 8).

Через 1 080 с после заливки температура в середине отливки в первом случае выше, а нагрев стенок

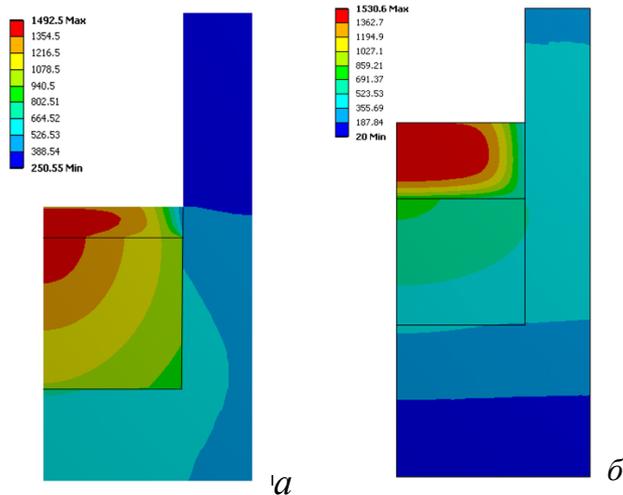


Рисунок 9 – Модель распределения температурных полей спустя 960 с после заливки расплавленного металла в форму: *а* – толщина шлака 20 мм, *б* – толщина шлака 60 мм

кокиля во втором случае происходит не так интенсивно. Температура донной водоохлаждаемой части кокиля имеет практически постоянное значение, что отражается на процессе кристаллизации и формировании макроструктуры (рисунок 8).

Толщина шлаковой надставки оказывает существенное влияние, как на конфигурацию температурного поля, так и на размеры и форму усадочной раковины (рисунок 9). Она уменьшается и становится более полой при увеличении толщины тепловой надставки. При кристаллизации расплавленного

металла происходит процесс усадки на свободной поверхности отливки. Цветовая гамма полей распределения температуры, представленных на рисунках 8,9 различна в зависимости от конкретных условий получения отливки.

По полученным расчетным данным были построены температурные зависимости отливки и кокиля от времени (рисунок 10). После заливки жидкого металла температура наружной поверхности кокиля повышается, что приводит к значительным тепловым потерям. Толщина стенок кокиля существенно влияет на интенсивность поглощения ею тепла, а также на скорость затвердевания отливки.

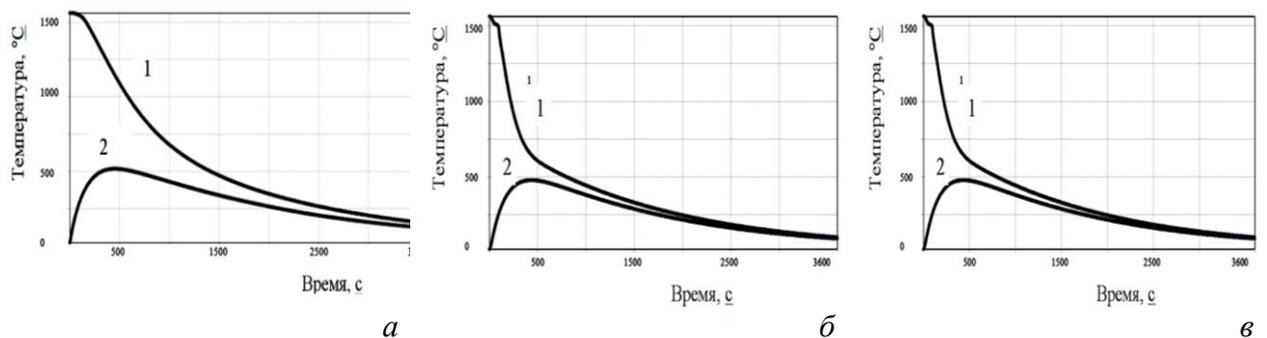
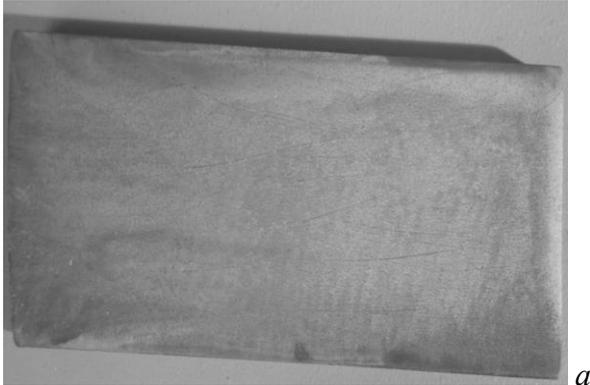


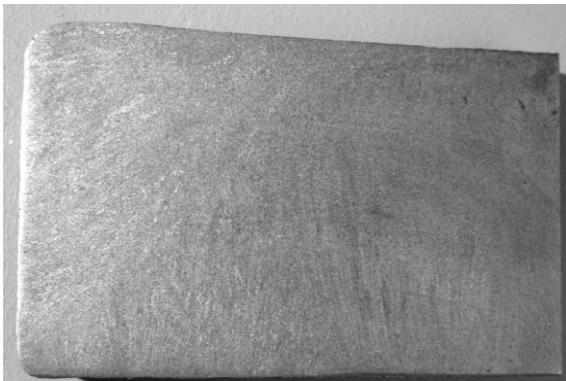
Рисунок 10 – Зависимость температуры отливки *1* и стенки кокиля *2* от времени охлаждения: *а* – толщина донной части – 120 мм, верхнего шлакового слоя – 60 мм; *б* – то же с принудительным охлаждением донной части; *в* – толщина донной части 60 мм, верхнего шлакового слоя – 20 мм

При заливке расплавленного металла под слоем шлака интенсивно охлаждается шлак у стенок кокиля. Одновременно происходит интенсивный

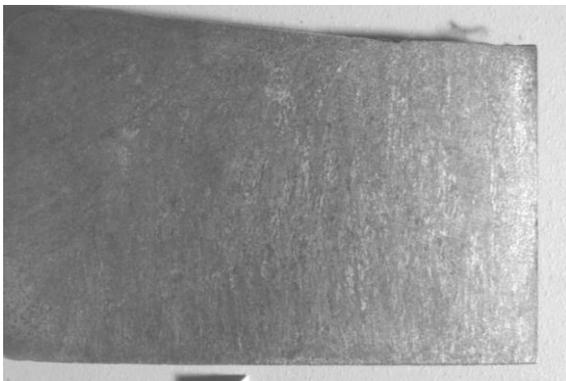
разогрев стенок кокиля и увеличение температуры с момента соприкосновения с жидким шлаком, в дальнейшем температура отливки и



а



б



в

Рисунок 11 – Макроструктура отливок, полученных при разном распределении температурных полей: *а* – толщина донной части – 120 мм, верхнего шлакового слоя – 60 мм; *б* – то же с принудительным охлаждением донной части; *в* – толщина донной части 60 мм, верхнего шлакового слоя – 20 мм

кокиля снижаются с постепенным уменьшением градиента температур между кокилем и отливкой (рисунок 10, *а*). В случае принудительного охлаждения донной части кокиля формируется максимальный температурный градиент вдоль вертикальной оси отливки (рисунок 10, *б*). Характер изменения температуры отливки и кокиля существенно изменяется при уменьшении толщины шлаковой надставки. В этом случае увеличивается скорость охлаждения отливки за счет повышения теплопередачи в верхней части отливки (рисунок 10, *в*).

Строение отливок, полученных при различных условиях кристаллизации, имеют существенные отличия в зависимости от характера распределения температурных полей (рисунок 11). Структура отливки, полученной в условиях обычного охлаждения (рисунок 11, *а*), существенно отличается от структуры отливки с принудительным охлаждением донной части. В этом случае наблюдается преимущественно вертикальная ориентация зерен на большей площади, хотя в левой части имеется область, в которой зерна ориентированы под углом  $45^\circ$  (рисунок 11, *б*). Это следствие значительного отвода тепла за счет боковых стенок кокиля, поскольку они имеют непосредственный контакт с охлаждаемой донной частью.

Структура отливки, полученной с наличием небольшой тепловой надставки, не имеет выраженной направленности (рисунок 11, *в*), образуется усадочная раковина наибольшей глубины, что указывает на

неблагоприятные условия кристаллизации.

Таким образом, вычисления проводились с целью изучения кинетики охлаждения отливок при электрошлаковом кокильном литье, что напрямую влияет на структуру отливки из инструментальной стали.

**В заключении** представлены основные выводы и результаты работы.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ:

На базе проведенных в работе исследований решена актуальная научно-техническая задача, направленная на повышение качества отливок из легированной инструментальной стали, полученных электрошлаковым кокильным литьем, за счет применения модифицирования и рафинирования редкоземельными металлами в составе мишметалла и управления конфигурацией теплового поля в процессе охлаждения и кристаллизации металла. Получены следующие результаты:

1. Обосновано использование мишметалла на основе теоретических и экспериментальных исследований в качестве модификатора для стали 4X5МФС при ЭКЛ с целью получения дисперсной структуры, уменьшения содержания вредных примесей и неметаллических включений в отливках из инструментальной стали.

2. Установлено, что в результате модифицирования и рафинирования стали 4X5МФС редкоземельными металлами в составе мишметалла в количестве 0,15–0,2 мас. % при электрошлаковом кокильном литье после предварительного проведенного раскисления алюминием происходит десульфурация и дефосфорация металла в среднем на 30 %.

3. Выявлено, что присутствие в качестве модификаторов редкоземельных металлов в исследуемых отливках, полученных ЭКЛ, способствует переводу грубых пленочных включений в глобулярные образования, значительному изменению размерного соотношения неметаллических включений, уменьшению в 3 раза общего количества в результате глобулизации, укрупнения и последующего их всплывания.

4. Установлено, что модифицирование и рафинирование редкоземельными металлами в составе мишметалла при электрошлаковом кокильном литье инструментальной стали способствует улучшению структуры и повышению прочности при растяжении более 1600 МПа и ударной вязкости выше 0,30 МДж/м<sup>2</sup>.

5. Выявлена взаимосвязь между механическими свойствами и общим содержанием неметаллических включений, указывающая, что при образовании включений размерами более 5 мкм происходит существенное уменьшение прочностных и пластических характеристик.

6. Установлено на основании компьютерного моделирования распределения температурных полей влияние конструкции кокиля, величины тепловой надставки и условия охлаждения на структуру отливок из стали 4X5МФС в процессе их кристаллизации.

7. Показано, что применение кокиля с принудительным охлаждением и модифицирования при ЭКЛ для исследуемой стали способствует дополнительному увеличению предела прочности на растяжение более 1690 МПа.

8. Испытания матриц из модифицированной стали 4X5МФС, полученной ЭКЛ, прошли производственную апробацию, которая показывает, что стойкость опытных матриц не уступает стойкости матриц, изготовленных по обычной технологии, а качество поверхности прессованных изделий улучшается.

### **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:**

*Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук:*

1. **Ларионова, Н.В.** Распределение неметаллических включений при затвердевании штамповой стали в условиях электрошлаковых процессов / А.М. Токмин, В.Н. Падар, Н.В. Ларионова // Технология машиностроения. 2009. № 11. С. 3–6 (издания, рекомендуемые ВАК).

2. **Ларионова, Н.В.** Исследование тепловых процессов кристаллизации отливок электрошлакового кокильного литья / Н.В. Ларионова, А.М. Токмин, Л.А. Свечникова, А.М. Синичкин // Литейное пр-во. 2016. № 6. С. 22–25 (издания, рекомендуемые ВАК).

3. **Ларионова, Н.В.** О влиянии неметаллических включений на свойства кокильных заготовок, полученных электрошлаковым литьем / Н.В. Ларионова, А.М. Токмин, П.О. Шалаев, Р.В. Есин // Металлургия машиностроения. 2017. № 3. С. 39–40 (издания, рекомендуемые ВАК).

4. **Ларионова, Н.В.** Исследование условий охлаждения на структуру и свойства отливок из стали 4X5МФС / Н.В. Ларионова, А.М. Токмин, О.А. Масанский // Техника и технологии. 2018. Т. 11, № 4. С. 488–494 (издания, рекомендуемые ВАК).

5. **Ларионова, Н.В.** Исследование влияния модифицирования на строение и свойства отливок из стали 4X5МФС, полученных с применением электрошлаковой технологии / Н.В. Ларионова, А.М. Токмин, В.С. Казаков, О.А. Масанский // Техника и технологии. 2019. Т. 12, № 5. С. 599–606 (издания, рекомендуемые ВАК).

#### *Публикации в прочих научных изданиях*

6. **Ларионова, Н.В.** Влияние модифицирования комплексными порошковыми модификаторами на структуру свойства литых штампов из стали 4X5МФС (тезисы) / Н.В. Ларионова, А.М. Токмин, В.И. Темных // «3-е собрание металлургов России». Рязань ЦНТИ. 1996 г. С.28–32

7. **Ларионова Н.В.** Влияние количества, морфологии и распределения неметаллических включений на механические свойства теплостойких сталей мартенситного класса (статья) / Н.В. Ларионова, А.М. Токмин, Л.А. Свечникова // Материалы XVI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Москва. 2010.

8. **Ларионова, Н.В.** Применение поверхностно-активных модификаторов в условиях электрометаллургии высоколегированных сталей (тезисы) / Н.В. Ларионова, А.М. Токмин, Л.А. Свечникова // XIV Международная научная конференция, посвященная памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. 2010.

9. **Ларионова, Н.В.** «Микроструктура и свойства отливок из штамповых сталей, полученных с применением электрошлаковой технологии» (тезисы) / Н.В. Ларионова, В.Н. Падар, А.М. Токмин, Л.А. Свечникова // Материалы XVIII международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Москва. 2012.

10. **Ларионова, Н. В.** Анализ тепловых процессов в отливках электрошлакового кокильного литья / Н.В. Ларионова, О.А. Масанский, А.М. Токмин, Л.А. Свечникова // «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Москва. 2015.

11. **Ларионова, Н.В.** Макроструктура, свойства легированной стали, полученной с применением электрошлаковой технологии / Н.В. Ларионова, О.А. Масанский, А.М. Токмин, Л.А. Свечникова, П.О. Шалаев // «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Москва. 2017.

12. **Ларионова, Н.В.** Исследование влияния тепловых процессов при кристаллизации на структуру и свойства штамповой стали 4Х5МФС / Н.В. Ларионова, А.М. Токмин // Сборник докладов девятого международного конгресса «Цветные металлы и минералы». XXII конференция «Алюминий Сибири». С 584–590.

13. **Ларионова Н.В.,** Токмин А.М., Свечникова Л.А. Влияние модифицирования рзм на природу неметаллических включений штамповой стали / Н.В. Ларионова, А.М. Токмин, Л.А. Свечникова // Сборник докладов десятого международного конгресса «Цветные металлы и минералы», XXIV конференция «Алюминий Сибири». 2018.

14. Программа для ЭВМ: «Mechanical Properties» **Ларионова Н.В.,** Шалаев П.О., Токмин А.М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017615806 от 24.05.2017 г.

15. Решение о выдаче патента по заявке на изобретение: «Способ изготовления отливок методом электрошлакового литья» **Ларионова Н.В.,** Токмин А.М., Бабкин В.Г. № 2019109629 от 09.12.2019.