

На правах рукописи



АРАПОВ Станислав Леонтьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ
ВЫСОКОМАРГАНЦЕВЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ
ОТЛИВОК**

Специальность 2.6.3 – Литейное производство
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2023

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель:

д-р техн. наук, профессор **Беляев Сергей Владимирович**

Официальные оппоненты:

Савинов Александр Сергеевич, д-р техн. наук, доцент, директор Института металлургии, машиностроения и материалообработки федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Аникеев Владимир Викторович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры "Литейные и высокоэффективные технологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Защита состоится 22 декабря 2023 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.404.01 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу 660025, г. Красноярск, пр. «Красноярский рабочий», д. 95, ауд. 219.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и на сайте <http://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.404.01



Лесив Елена Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Условия эксплуатации глиноземного и горнодобывающего оборудования алюминиевого производства носит крайне агрессивный характер. На этапе подготовки сырья, при дроблении и размоле, факторами, лимитирующими срок эксплуатации обогатительного оборудования, являются абразивный и ударно-абразивный износ. Всю нагрузку необходимую для измельчения материала принимают на себя рабочие элементы, такие как брони, молотки, а также бронефутеровки различных видов и назначений, от срока службы которых зависит эффективная работа оборудования.

Задача повышения срока службы литых комплектующих решается в первую очередь за счет совершенствования конструкции обогатительного оборудования, обеспечивающего снижение и распределение рабочих нагрузок и т. п. Другим способом является применение новых и более прогрессивных литейных материалов при изготовлении данных деталей, что позволяет не только увеличить эксплуатационные показатели на всем протяжении работы обогатительного оборудования, но и повысить запас его надежности и снизить количество внеплановых остановок.

Настоящая работа выполнялась в соответствии с государственным заданием на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», номер проекта FSRZ-2020-0013 в рамках Федеральной программы «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности», утвержденной Постановлением Правительства РФ от 15.04.2014 № 328 (ред. от 02.06.2022) и Государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» утвержденной Постановлением Правительства РФ от 29 марта 2019 г. № 377 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации».

Степень разработки темы: Исследования таких отечественных ученых, как Вдовин К.Н., Давыдов Н.Г., Колокольцев В.М., Лихолобов Е.Ю., Мирзаев Д.А., Савинов А.С., Феоктистов Н.А., Филиппов М.А. Чайкин В.А., Шрамко М.С. и др. разработали научно-технические основы плавки и литья высокомарганцевых аустенитных сталей (ВМАС), внесли существенный вклад в развитие технологии получения отливок повышенного качества, что послужило методологической и научной базой настоящего исследования. Вместе с тем, поставленная в работе задача повышения эксплуатационных параметров отливок для изготовления обогатительного оборудования остается по-прежнему актуальной и требует проведения дополнительных исследований в данном направлении.

Объектом исследования является ВМАС, ее химический состав, литейные материалы, оснастка и оборудование, технологический процесс получения отливки «броня конусная».

Цели и задачи работы. Целью работы являлось разработка комплекса технических и технологических решений, обеспечивающих повышение механических и эксплуатационных свойств отливок из ВМАС, полученных методом фасонного литья.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Провести исследования численными методами и с последующим верифицированием полученных результатов в промышленных условиях:

- влияния химического состава ВМАС системы Fe-C-Mn-Si-Cr-Mo-Ni на формирование структуры и эксплуатационные свойства отливки;
- формирование зерна аустенита в зависимости от технологических параметров литья;
- образование усадочных дефектов в термических узлах, расположенных в монтажных петлях отливки «броня конусная» для различных вариантов расположения элементов литниково-питающей системы.

2. Определить рациональный химический состав ВМАС, обеспечивающий с наибольшей надёжностью достижение максимальных значений механических и эксплуатационных свойств отливки «броня конусная».

3. Разработать и внедрить технологию изготовления отливки «броня конусная», обладающей повышенными механическими и эксплуатационными свойствами.

В работе достигнуты результаты, отличающиеся **научной новизной**:

1) Расширена база данных по влиянию концентраций легирующих элементов системы Fe-C-Mn-Si-Cr-Mo-Ni на механические и эксплуатационные свойства ВМАС, что позволило на основе применения статистической обработки получить новый химический состав ВМАС со стабильно высокими свойствами: ударная вязкость КСУ - не менее 2,8 Дж/м², твердость – не менее 229 НВ.

2) В исследуемой области установлена зависимость размера зерна от температуры литья ВМАС, что позволяет производить косвенную оценку механических свойств разработанного сплава в зависимости от изменения технологических параметров.

3) Проведена количественная оценка влияния типа и расположения литниковой системы на объем усадочных раковин отливки «броня конусная», а полученные результаты, подтвержденные промышленными экспериментами,

позволили получить годное литье без литейных дефектов и с повышенным сроком эксплуатации.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Реализованы численные расчеты:

а) формирования размеров аустенитного зерна ВМАС системы Fe-C-Mn-Si-Cr-Mo-Ni с учетом влияние химического состава ВМАС и технологических параметров литья;

б) определения формы и размеров усадочных дефектов в объеме отливки «броня конусная» в зависимости от различных вариантов расположения элементов литниково-питающей системы.

2. Научно обоснован и подтвержден в промышленных условиях новый состав ВМАС системы Fe-C-Mn-Si-Cr-Mo-Ni, который с наибольшей надёжностью обеспечивает достижение максимальных значений механических и эксплуатационных свойств отливки «броня конусная».

3. Разработан и внедрен новый технологический регламент для изготовления отливки «броня конусная», обеспечивающий повышение работоспособности металлургического оборудования в 1,5 раза, что подтверждается соответствующим актом внедрения.

4. Результаты исследований внедрены в учебный процесс Сибирского федерального университета и используются при обучении магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия» и магистерской программе 22.04.02.07 «Теория и технология литейного производства цветных металлов и сплавов» и аспирантов по специальности 2.6.3 – Литейное производство (технические науки).

Реализация результатов работы:

Результаты работы прошли промышленные испытания и внедрены в литейном производстве ООО «Инжиниринг Строительство Обслуживание» филиала АО «РУСАЛ Ачинск».

Методы исследования. Работы выполнены с применением современных методов исследования микроструктуры, механических свойств, химического состава; статистического анализа данных с использованием программы Statistica; численного метода решения и компьютерного моделирования с использованием программных комплексов ProCAST.

На защиту выносятся следующие положения:

- результаты определения рационального химического состава ВМАС системы Fe-C-Mn-Si-Cr-Mo-Ni;

- результаты численных расчетов размеров зерна аустенитной микроструктуры для исследуемых составов ВМАС с учетом технологических параметров литья;

- форма и размеры усадочных дефектов в объеме отливки «броня конусная», определенные с помощью программного комплекса ProCAST для различных вариантов расположения элементов литниково-питающей системы;

- новая технология изготовления отливки «броня конусная», обладающей повышенными механическими и эксплуатационными свойствами.

Личный вклад автора заключается в научной постановке задачи исследования, планировании и проведении экспериментов, в разработке методик исследования и обработке экспериментальных данных, в анализе полученных результатов и в формировании выводов, заключений, написании научных статей. Организация и проведение опытно-промышленных испытаний в производственных условиях АО «РУСАЛ Ачинск».

Настоящая работа является продолжением научно-исследовательских работ, выполняемых на кафедре «Литейное производство» Института цветных металлов и материаловедения СФУ в рамках научно-исследовательских работ с ОК «РУСАЛ». Включенные в диссертацию и выносимые на защиту результаты настоящей работы представляют собой часть общих результатов научно-исследовательских работ по рассматриваемой проблеме, которые были выполнены автором с соавторами за годы совместной работы и были получены непосредственно автором или при его ведущем участии.

Степень достоверности научных положений и полученных результатов обоснована:

- применением современных методов исследования высокомарганцевой стали, компьютерного моделирования и статистической обработки данных;

- сравнением и подтверждением расчетных данных с результатами физических экспериментов и образцов, а также сопоставлением результатов исследований с результатами других исследователей в этой области;

- практической реализацией и подтверждением эффективности полученных результатов, при разработке технических и технологических решений, в условиях действующего производства;

Текст диссертации и автореферата проверен на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат. ВУЗ».

Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на XI Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии», «НИТУ «МИСиС», г. Москва, Международной конференции «Современные научные подходы в фундаментальных и прикладных исследованиях», НИИ «Нацразвитие», г.

Санкт-Петербург, LVIII Международной научно-практической конференции «Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований», г. Новосибирск, а также на научно-методических семинарах кафедры «Литейное производство» Сибирского федерального университета и ООО «РУСАЛ ИТЦ» в 2018-2023 гг.

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 9 печатных работах, в том числе 4 статьях в журналах перечня ВАК РФ, 1 статья в изданиях из базы Scopus.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне, соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.6.3. Литейное производство (технические науки): 1) Исследование физических, физико-химических, теплофизических, технологических, механических и эксплуатационных свойств материалов, как объектов и средств реализации литейных технологий; 3) Исследование процессов формирования структуры и свойств литейных сплавов, формовочных и стержневых смесей; 7) Разработка методов моделирования процессов: приготовления и заливки расплавов, модифицирования, затвердевания и охлаждения литых заготовок и изделий, формообразования, упрочнения и разрушения литейных форм и стержней, а также их напряжённого состояния; 11) Исследование качества отливок и разработка систем управления их качеством; 15) Применение цифровых технологий в литейных процессах; 17) Разработка и освоение новых литейных сплавов и материалов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы, содержащего 116 источников и 3 приложения. Основные материалы изложены на 140 страницах, включая 32 таблицы и 88 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована и обоснована актуальность тематики диссертационной работы, обозначены цели и задачи, представлены научная и практическая значимость диссертационного исследования.

В первой главе представлен литературный обзор научно-технической информации и проанализировано современное состояние исследований в области свойств ВМАС типа 110Г13Л, влияния химических элементов и конструктивных и технологических параметров литья на свойства отливок из ВМАС. Показано, что срок службы литых деталей из ВМАС для обогатительного оборудования для алюминиевого производства является относительно невысоким, что отрицательно сказывается на эффективности работы данного оборудования. В литейном производстве ООО «Инжиниринг

Строительство Обслуживание» филиала в г. Ачинск» для изготовления отливок из ВМАС применяется современное оборудование, литейная оснастка и материалы.

Применение ВМАС типа 110Г13Л в качестве материала для деталей обогатительного оборудования обусловлено ее особенностью к образованию в аустенитной структуре упрочненного наклепом слоя толщиной до 12 мм и поверхностной твердостью достигающей 550 НВ. Управление процессами деформации в структуре ВМАС осуществляется за счет легирования и модифицирования дополнительными химическими элементами, а также минимизацией содержания вредных примесей, ослабляющих границы между зернами аустенита. Ключевое значение в данном контексте приобретает структура металла, а именно факторы влияющие на повышение пластичности и сопротивление износу. Воздействие на структуру ВМАС за счет введения дополнительных элементов, является наиболее действенным подходом, позволяет повысить начальную твердость поверхности и значительно снизить пластическую деформацию.

Основными элементами химического состава ВМАС стали являются С и Mn. Взаимная зависимость содержания данных элементов друг от друга, оказывает ключевое влияние на такую характеристику, как ударная вязкость КСУ. Температурные режимы литья ВМАС являются основополагающим фактором формирования литой микроструктуры отливок. В ВМАС данный технологический фактор имеет ключевую роль, является основным инструментом регулирования и получения мелкозернистой микроструктуры. Превышение температуры литья ВМАС служит причиной транскристаллизации, которая неизменно приводит к увеличению размеров зерна первичного аустенита в процессе кристаллизации отливки и образованию столбчатой микроструктуры, что в свою очередь влечет за собой снижения таких ключевых показателей, как ударная вязкость, трещиностойкость, хладостойкость и абразивная износостойкость, а также появление горячих трещин в процессе кристаллизации. Поэтому поиск рационального соотношений элементов химического состава ВМАС, целесообразно рассматривать только в комплексе с рациональными режимами литья, что позволит получить структуру отливок с повышенным уровнем механических и эксплуатационных свойств.

На основании анализа литературных данных о существующем российском и международном опыте по вопросам качества отливок из ВМАС были сделаны выводы, поставлены цель и задачи исследования.

Во второй главе представлены использованные методики проведения исследований (в том числе разработанные и усовершенствованные автором)

для определения в отливках из ВМАС усадочной пористости, микро- и макроструктуры, механических и технологических свойства. Объектом исследований были промышленные ВМАС, химический состав которых соответствовал требованиям ГОСТ 977-88.

Металлографические исследования структуры проведены методом оптической микроскопии, для проявления структуры выполнено травление образцов реактивом на основе хлорного железа $\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$ персульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$, соляной кислоты HCl и воды H_2O . Визуальный анализ проводился на световом микроскопе Observer.A1m, Carl Zeiss при увеличениях $\times 100$, $\times 200$, $\times 500$, $\times 1000$ крат. Количественную оценку включений карбидов и микроструктуры металлической основы осуществляли в программе AxioVision. Дополнительно был использован микроскоп МетамРВ-21. Поэлементный состав образцов стали определялся с помощью эмиссионного спектрального анализа спектрометром ДФС-500 в комплекте со стендом очистки аргона «СОАР-1» и эмиссионным спектрометром МСАИВ5 в комплекте со стендом очистки аргона «ЭПИШУР-А 03СЛ». Ударная вязкость определялась при разрушении образца с U-образным надрезом-концентратором при использовании маятникового копра МК-30А. Значение поверхностной твердости было получено на лабораторном испытательном твердомере модели ТШ-2. Замер диаметрального размера лунки на поверхности исследуемых образцов проводился с помощью микроскопа отсчетного модели МПБ-2. Стойкость к истиранию оценивали по потере массы образца. Испытания проводили на автоматическом шлифовально-полировальном станке АТМ SAPHIR 520 с нагрузкой на образцы 100 Н, при скорости вращения шлифовального круга 250 мин^{-1} в течение 40 мин. При испытании использовали алмазный шлифовальный диск Cameo Platinum I - зерно P120-P180.

Третья глава посвящена определению рационального диапазона химических элементов ВМАС. Основой обработки массива данных промышленных экспериментов, послужили результаты данных из 28 плавки стали системы Fe-C-Mn-Si-Cr выплавки ВМАС в следующем диапазоне содержания основных элементов: С – $0,96 \div 1,4$ %; Mn - $11,88 \div 16,41$ %; Si – $0,45 \div 0,82$ %; Cr - $0,1 \div 1,2$ %; Ni - $0,2 \div 0,45$ % и Мо - $0,15 \div 0,5$ %, обеспечивающим ударную вязкость (КCU) в интервале $1,9 \div 2,3 \text{ МДж/м}^2$. Установлено, что сталь Fe-1,1C-12,87Mn-0,6Si-0,4Cr имеет значимую надежность 1,0, значения которой изменялись следующим образом в зависимости от содержания основных элементов (рис. 1).

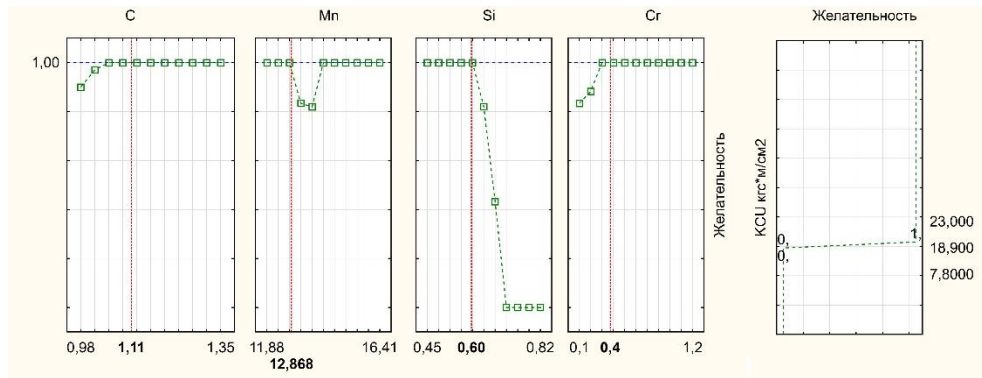


Рисунок 1 – Профиль прогнозируемых значений для исследуемого интервала КСУ $1,9 \div 2,3$ МДж/м²

Показано, что углерод обеспечивает значимую надежность 1,0 в интервале $1,11 \div 1,36$ %. Содержание марганца снижает значимую надежность в интервале $12,87 \div 13,89$ % до 0,8, но при дальнейшем увеличении концентрации до 16,41 % значимая надежность становится равной 1,0.

Зависимость КСУ от содержания кремния показывает, что при увеличении содержания кремния свойства снижаются. Причем максимальные показатели КСУ достигаются при содержании кремния менее 0,6%. Повышение содержания хрома не влияет на КСУ при его содержании в интервале $0,4 \div 1,2$ %.

На втором этапе исследуемый химический состав был скорректирован в части дополнительного легирования Мо в диапазоне $0,1 \div 0,5$ % и Ni $0,1 \div 0,5$ %. На данном этапе было осуществлено исследование и обработка данных 21 образца.

Проведя оптимизацию модели для достижения целевого диапазона значений КСУ $2,4 \div 3,0$ МДж/м² при дополнительном введении Ni и Мо, было установлено значительное изменение точек оптимума элементов химического состава ВМАС.

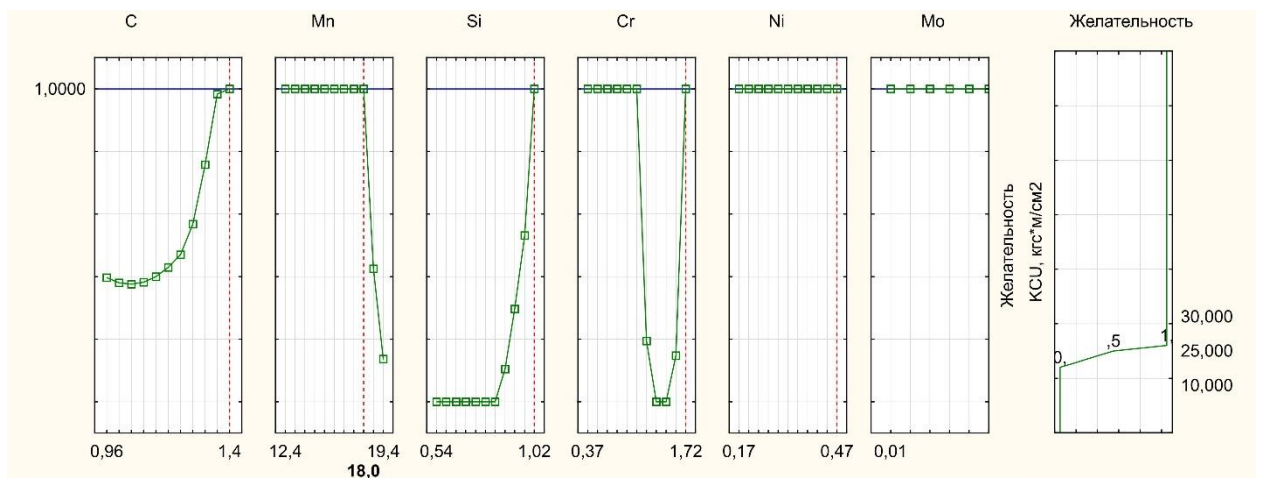


Рисунок 2 – Профиль оптимизированной модели для КСУ 25 – 30 кгс*м/см² дополнительно легированной Ni и Мо

Полученная модель несмотря на высокую расчетную достоверность, имеет свои недостатки в части распределения содержания элементов на линии оптимума системы. Так содержание углерода представлено только единичным значением в точке оптимума 1,4 %. Распределение Mn можно характеризовать равномерным на всем интервале $12,4 \div 18,0$ %, при точке оптимума 18,0%. Весьма значительный интервал при анализе поверхности отклика взаимосвязи элементов немного сократился до $12,5 \div 17$ %. Характер распределения Si схож с положением C на линии оптимума, аналогично представлен единичной точкой 1,02 %. Дальнейшее исследование эффективного диапазона, в том числе и по основным элементам, целесообразно было провести на физических образцах, что и было реализовано при заключительном этапе.

Для уточнения интервалов компонентов в новом составе ВМАС, был выполнен расчет и анализ контурного графика поверхности отклика. Попарный анализ представлен на всем исследуемом промежутке долей элементов, что позволило с достаточной точностью скорректировать интервалы (рис. 3).

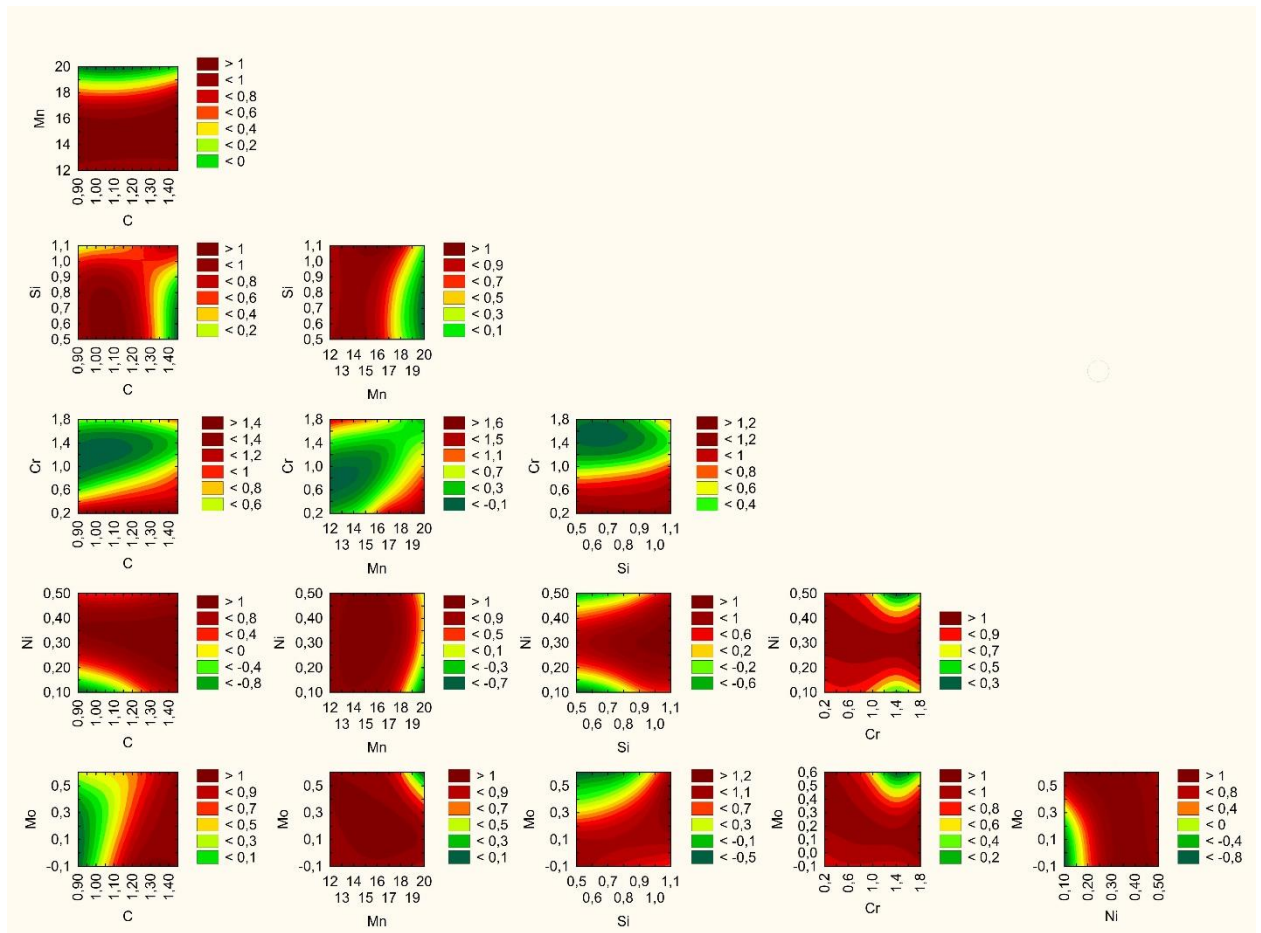


Рисунок 3 – Поверхностный отклик оптимизированной модели проектного состава стали

Распределение введенных тугоплавких элементов Cr и Mo отличаются содержанием и характером расположения. Так Cr имея стабильную область в пределах $0,37 \div 0,9$ % с последующем снижением до 1,45 % относительно линии

оптимума системы. В тоже же время точка оптимума, расположенная на отметке 1,72 % характеризуется как значение наиболее эффективное. Опираясь на особенности последующего получения сплава в промышленных условиях, целесообразно рассматривать весь диапазон в отрезке $0,32 \div 1,72\%$. Содержание Mo и Ni равно распределены на всем промежутке расчетной модели в диапазоне $0,1 \div 0,5\%$.

Наибольшее влияние имеет содержание углерода в диапазоне $0,9 \div 1,4\%$ для концентрации Mn $12,5 \div 17,0\%$. Область парного влияния углерода и кремния, можно расценивать как значимую для углерода в интервале $0,95 \div 1,15\%$ и для кремния - $0,5 \div 0,8\%$. Парное влияние связки углерод – никель оказывает наибольшую значимость при содержании углерода $1,2 \div 1,4\%$ при никеле - $0,2 \div 0,4\%$. Исследуя модель влияния концентраций углерода и молибдена, стоит отметить область $1,3 \div 1,4\%$ по углероду и $0,1 \div 0,5\%$ для молибдена, как наиболее значимую в формировании свойств. Связь углерода – хром не показывает обширных и значимых областей влияния данной связки элементов.

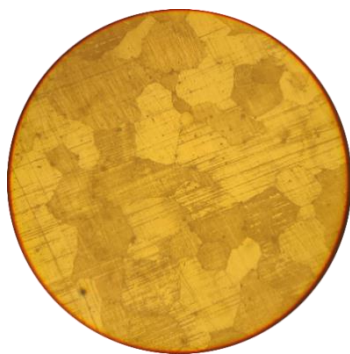
Для связки марганец – кремний стоит выделить область содержания марганца от 12,0 до 17,0 % и для кремния - $0,5 \div 1,1\%$. Модель влияния марганца и хрома не показала областей влияния связи данных элементов на формирование КСУ, однако поверхность отклика парной взаимосвязи марганец – никель стоит считать весьма обширной как для марганца с содержанием 12,5 – 18,0 %, так и для никеля в диапазоне от 0,1 до 0,5 %. Весьма обширная зона наблюдается на модели влияния концентрации связки марганец – молибден (марганец $12,0 \div 17,0\%$, молибден $0,1 \div 0,4\%$).

Стоит отметить область в диапазоне по кремнию $0,5 \div 1,1\%$ при достаточно стабильной концентрации хрома 0,2 %. Поверхность отклика взаимосвязи кремний – никель, позволяет определить весьма точную область с содержанием кремния $0,9 \div 1,1\%$ и никеля $0,25 \div 0,40\%$. Несмотря на обширную область связки кремний – молибден, модель позволяет выделить весьма точный диапазон для кремния $1,0 \div 1,1\%$ и для молибдена $0,1 \div 0,4\%$.

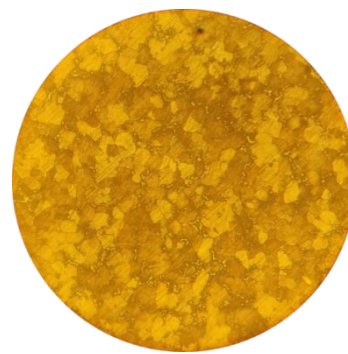
Содержание хрома остается значимым при концентрации данного элемента в диапазоне от 0,2 до 1,8 %, для никеля $0,20 \div 0,35\%$ и молибдена от 0,1 до 0,2 %. Рассматривая отдельно влияние молибдена и никеля на формирование ударной вязкости, стоит выделить диапазон концентрации молибдена в пределах $0,1 \div 0,5\%$ и никеля $0,2 \div 0,5\%$.

Таким образом, результатом обработки данных послужил новый состав ВМАС, система химических элементов которого имеет вид Fe-1,1C-1,6Mn-0,8Si-1,3Cr-Mo-Ni. Далее было проведено сравнительное металлографическое

исследование микроструктуры базового состава стали 110Г13Л и нового состава ВМАС Fe-1,1C-16Mn-0,8Si-1,3Cr-Mo-Ni.



110Г13Л ГОСТ 977-88



Новый состав ВМАС

Рисунок 4 – Микроструктура образцов 110Г13Л и Fe-1,1C-16Mn-0,8Si-1,3Cr-Mo-Ni, x100

Структура образца стали 110Г13Л имеет самое крупное из представленных зерен аустенита и соответствует баллу 1÷2, в то время как размер зерна новой стали характеризуется 5÷6 баллом.

Повышенное содержание Cr, Mo и Ni в образце новой стали оказали благоприятное воздействие на формирование стабильной структуры аустенита. Создав дополнительные центры кристаллизации и препятствуя росту зерна аустенита, что послужило механизмом формирования мелкозернистой структуры, которая наиболее перспективна для устойчивого мартенситного превращения.

Микроструктура образца новой стали в отличие от марки 110Г13Л, содержит в своем составе упрочняющую карбидную сетку. Учитывая повышенное содержание карбидообразующих, тугоплавких и износостойких элементов, которыми дополнительно легирован базовый состав металла, логично заключить, что состав данных карбидов имеет сочетание элементов Cr-Mo-Mn и, находясь в аустенитной матрице, окажутся препятствием для продвижения абразива и износу отливок.

Для оценки распределения легирующих элементов в исследуемых образцах определена микротвердость матрицы (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты испытания на абразивный износ, ударную вязкость KCU и твердость HB образцов 110Г13Л и новой стали

Образец	Начальная масса	Конечная масса,	Потеря массы	Относительное изменение массы	KCU	Твердость,
	г	г	г	%		
110Г13Л ГОСТ 977-88	36,33	31,61	4,72	13	2,4	195
новая сталь	49,45	45,29	4,16	8	2,8	229

Получено, что твердость аустенита в образце стали 110Г13Л составляет 170 HV, твердость аустенита образца новой стали – 240 HV, что свидетельствует о твердорастворном упрочнении легирующими элементами.

Дальнейшим шагом настоящего исследования является определение рационального соотношения основных элементов С и Mn. Сочетание с уже ранее применяемой методологией поверхностного отклика с последующим расчетом трехмерной модели зависимости ударной вязкости KCU от соотношения Mn/С, позволило понять кривизну поверхности отклика и оценить минимальные и максимальные эффекты.

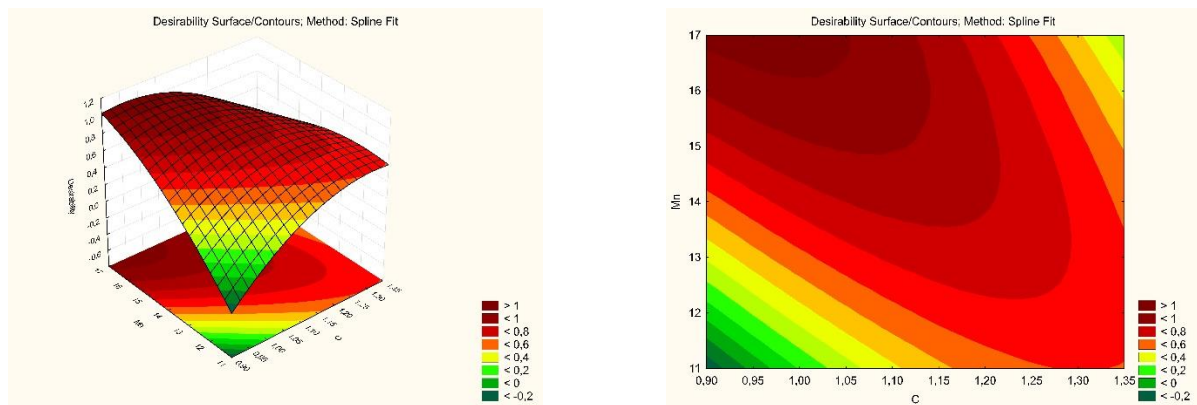


Рисунок 5 – Модель поверхностного отклика влияния соотношения Mn/С на формирование свойств ударной вязкости KCU

Устойчивая и стабильная область, которая оказывает максимальное воздействие на формирование ударной вязкости располагается в диапазоне содержания углерода $0,90 \div 1,15$ % и Mn $15,0 \div 17,0$ %. Тем не менее, данная область не позволяет конкретизировать точки максимума, значения которых позволят определить рациональное соотношение основных элементов С и Mn. Для дальнейшего анализа полученных показателей был выполнен расчет оптимизации.

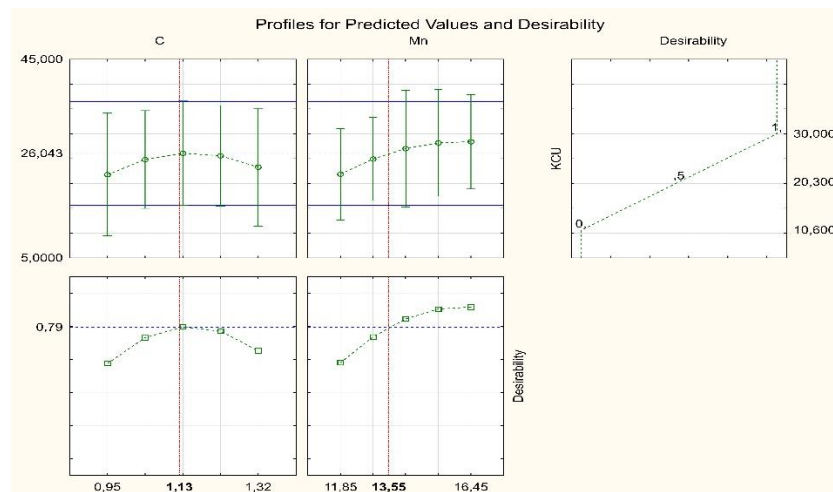


Рисунок 6 – Графическая модель влияния рациональных концентраций С и Mn

Наиболее желательными значениями является диапазон КСУ $2,4 \div 3,0$ МДж/м². Полученные кривые содержания углерода и марганца позволяют выделить следующие точки: для углерода отмечается точка 1,13%, которая лежит на линии показателя значимости модели, и она же является наивысшей, а для марганца следует отметить две точки - 13,55% и 16,45%. Значение 13,55% стоит рассматривать, как минимальное устойчивое значение, при котором данная система элементов будет иметь значение ударной вязкости в целевом диапазоне $2,4 \div 3,0$ МДж/м². В тоже время данная кривая имеет и максимальную точку при значении концентрации Mn 16,45%, и именно данное значение позволяет получить наибольшее значение ударной вязкости при содержании углерода 1,13%.

Таким образом, были определены значения для углерода 1,13% и марганца 16,45%, которые попадая в целевой интервал и область модели с наибольшей значимостью, позволяют назначить соотношение Mn/C = 14,56, как наиболее рациональное для спроектированной системы элементов Fe-1,1C-16Mn-0,8Si-1,3Cr-Mo-Ni новой стали.

В четвертой главе представлены новые технологические решения, повышающие эксплуатационные и механические свойства высокомарганцевых аустенитных сталей и в частности рассматриваемой новой стали.

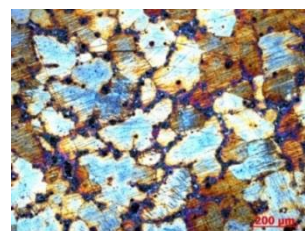
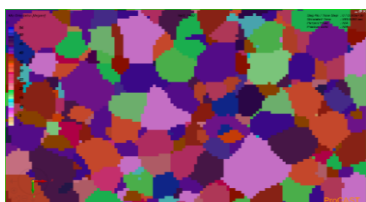
С помощью программного комплекса ProCAST была разработана компьютерная модель формирования зерна аустенита с учетом конструктивных и технологических параметров литья. Затем данная модель была верифицирована лабораторными металлографическими исследованиями. Сводная информация по размерам зерна аустенита в расчетной компьютерной модели, физических образцах представлена в таблице 3 и на рис. 7.

Таблиц 3 – Параметры микроструктуры образцов из новой стали

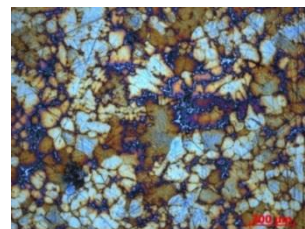
Температура литья	Расчетный размер зерна	Средний размер зерна	Средний размер карбидов, мкм	Доля карбидов,
°С	мкм	мкм	мкм	%
1440	154	150±33	31±7	1,0
1430	131	134±40	9±6	1,5
1410	121	116±21	16±8	1,4



а (1440 °С)



б (1430 °С)



в (1410 °С)

Рисунок 7 – Расчетные размеры зерна аустенита и фактическая металлография образцов полученных при различных температурах литья

Сопоставление данных цифрового и физического эксперимента представлено на рис. 8, что позволяет подтвердить высокую точность и сходимость результатов, а также показать зависимость между температурой литья и формированием размерности зерна аустенита.

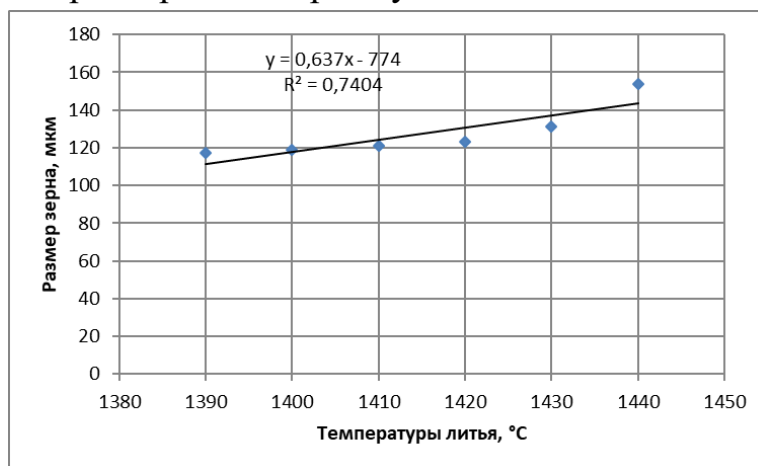


Рисунок 8 – Аппроксимация расчетных значений размеров зерна.

При этом было получено полиномиальное уравнение регрессии:

$$d_{GS} = 0,637T - 774, \quad (1)$$

где T - температура литья, °С; d_{GS} – размер зерна (мкм).

Для объективной оценки комплексного влияния концентрации элементов легирования и исследуемых температурных режимов литья, были проведены испытания образцов на определение значений механических свойств - абразивный износ и ударную вязкость КСУ в сравнении образцами, полученными на этапе отработки режимов литья (образцы а, б и в), а также стандартной стали Гадфильда марки 110Г13Л (табл. 4).

Таблица 4– Результаты испытаний на абразивный износ и ударную вязкость для образцов новой стали (а, б, в) и 110Г13Л.

Вид образца	Начальная масса, г	Конечная масса, г	Потеря массы, г	Относительное изменение массы, %	КСУ, МДж/м ²
а	71,43	67,53	3,9	5,5	2,3
б	79,69	78,08	1,61	2	2,6
в	69,18	67,93	1,25	1,8	2,8
110Г13Л	52,02	46,47	5,55	10	1,8

Приведенные данные подтверждают о значительной разнице, достигнутой в значениях таких ключевых показателях, как абразивная износостойкость и ударная вязкость новой и известной стали в среднем в 1,5 раза.

Для штатной литейной технологии характерно образование усадочных дефектов в термических узлах, расположенных в монтажных петлях, что приводило к образованию трещин и последующей поломки всей брони. Поэтому были исследованы четыре возможных варианта расположения элементов литниково-питающей системы, которые отличались распределением подачи металла в отливку, объемом и расположением элементов литниково-питающей системы, а также размещением отливки в литейной форме. На основе анализа полученных результатов вариант № 2 был признан более эффективным (рис. 9).

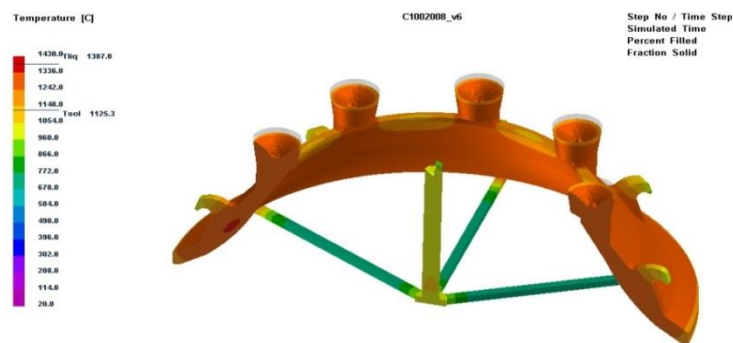


Рисунок 9 – Распределение температурных полей в отливке для варианта №2 расположения элементов литниково-питающей системы

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Исследовано в программном комплексе Statistica с применением функции Дерринжера-Суич влияние варьирования концентраций легирующих элементов системы Fe-C-Mn-Si-Cr-Mo-Ni на формирование ударной вязкости КСУ отливки «броня конусная».

2. Установлено с применением программного комплекса ProCAST с помощью метода конечных элементов клеточного автомата CAFE и верифицировано в промышленных условиях, что при увеличении температуры литья отливки «броня конусная» из ВМАС с 1410 до 1440°C возрастает средний размер аутенитного зерна с 116 мкм до 150 мкм, что снижает ударную вязкость КСУ с 2,8 до 2,3 МДж/м² и вызывает увеличение потери массы образцов под действием абразивного износа с 1,8 до 5,5 %.

3. С помощью программного комплекса ProCAST определены формы и размеры усадочных дефектов в объеме отливки «броня конусная» при различных вариантах расположения элементов литниково-питающей системы, что позволяет прогнозировать усадочный процесс при разработке технологии литейной формы.

4. Научно обоснован и подтвержден в промышленных условиях новый состав ВМАС системы Fe-C-Mn-Si-Cr-Mo-Ni, который с наибольшей надёжностью обеспечивает достижение максимальных значений механических и эксплуатационных свойств отливки «броня конусная».

5. Разработан и внедрен новый технологический регламент для изготовления отливки «броня конусная», обеспечивающий повышение работоспособности металлургического оборудования в 1,5 раза, что подтверждается соответствующим актом внедрения.

6. Результаты исследований внедрены в учебный процесс Сибирского федерального университета и используются при обучении магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия» и магистерской программе 22.04.02.07

«Теория и технология литейного производства цветных металлов и сплавов» и аспирантов по специальности 2.6.3 – Литейное производство (технические науки).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих научных изданиях:

1. **Арапов, С.Л.** Применение математической статистики для повышения ударной вязкости отливок из стали Гадфильда / С.Л. Арапов, С.В. Беляев, А.А. Косович [и др.] // *Металлург.* – 2022. - № 9, сентябрь. - С. 55–61 (**статья, рекомендуемая из перечня ВАК**).

2. **Арапов, С.Л.** Цифровой эксперимент как метод повышения механических свойств стали Гадфильда / С.Л. Арапов, С.В. Беляев, А.А. Косович [и др.] // *Черные металлы.* - 2022. – № 10. – С. 45-51 (**статья, рекомендуемая из перечня ВАК**).

3. **Арапов, С.Л.** Разработка цифровой модели влияния режимов литья на формирование микроструктуры стали / С.Л. Арапов, С.В. Беляев, А.А. Косович [и др.] // *Сборник тезисов докладов XI Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии», «НИТУ«МИСиС», г. Москва, 9 – 11 ноября 2022 года / Под редакцией проф. В.Д. Белова и доц. А.В. Колтыгина — М.: МИСиС, 2022 - С. 395-399.*

4. **Арапов, С.Л.** Разработка цифровой модели литейного процесса изготовления деталей горно-обогачительного оборудования / С.Л. Арапов, С.В. Беляев, А.А. Косович [и др.] // *Сборник тезисов докладов XI Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии», «НИТУ«МИСиС», г. Москва, 9 – 11 ноября 2022 года / Под редакцией проф. В.Д. Белова и доц. А.В. Колтыгина — М.: МИСиС, 2022 - С. 400-404.*

5. **Арапов, С.Л.** Цифровая обработка данных как инструмент оптимизации химического состава стали / С.Л. Арапов, С.В. Беляев, А.А. Косович [и др.] // *Сборник тезисов докладов XI Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии», «НИТУ«МИСиС», г. Москва, 9 – 11 ноября 2022 года / Под редакцией проф. В.Д. Белова и доц. А.В. Колтыгина - М.: МИСиС, 2022 - С. 405-409.*

6. **Арапов, С.Л.** Разработка компьютерной модели влияния Si на ударную вязкость высокомарганцевой стали / С.Л. Арапов, С.В. Беляев, А.А. Косович [и др.] // *Сборник тезисов докладов LVIII международной научно-практической конф. «Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований», «СибАК». - г. Новосибирск, 2022. - С. 82-87.*

7. **Арапов, С.Л.** Графическая модель влияния молибдена на ударную вязкость высокомарганцевой стали системы Fe-C-Mn-Si-Mo / С.Л. Арапов, С.В. Беляев, А.А. Косович [и др.] // Сборник тезисов докладов международной научно-практической конф. «Современные научные подходы в фундаментальных и прикладных исследованиях» - СПб: ГНИИ «Нацразвитие», 2022. – С. 41-43.

8. **Арапов С.Л.** Разработка компьютерной модели литейного процесса изготовления деталей горно-обогачительного оборудования / С.Л. Арапов, С.В. Беляев, А.А. Косович [и др.] // Литейщик России. - 2023. - № 1. - С. 15-17 **(статья, рекомендуемая из перечня ВАК).**

9. **Арапов, С.Л.** Разработка цифровой модели влияния режимов литья на формирование микроструктуры стали / С.Л. Арапов, С.В. Беляев, А.А. Косович [и др.] // Литейщик России - 2023. - № 1. - С. 32-34 **(статья, рекомендуемая из перечня ВАК).**

10. **Arapov S.** Application of mathematical statistics to improve Hadfield steel casting impact strength / Arapov S., Belyaev S., Kosovich A [etc]. // Metallurgist. - 2023. - № 66. – P. 1083-1091.

Подписано в печать _____.202___. Печать плоская. Формат 60x84/16

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ _____

Отпечатано полиграфическим центром
Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел./факс: 8(391)206-26-67, 206-26-49
e-mail: print_sfu@mail.ru; <http://lib.sfu-kras.ru>