Чайкин А. В.
Чайкин В. А.

Научно обоснованные технологические процессы модифицирования и рафинирования чугунов и сталей для отливок ответственного назначения с использованием дисперсных материалов



А. В. Чайкин, В. А. Чайкин

НАУЧНО ОБОСНОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ И РАФИНИРОВАНИЯ ЧУГУНОВ И СТАЛЕЙ ДЛЯ ОТЛИВОК ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Монография

Санкт-Петербург
Наукоемкие технологии
2026

УДК 621.74:669.1
ББК 34.61
Ч-15

Рецензенты:
Д. А. Болдырев, д-р техн. наук, профессор;
Б. М. Немененок, д-р техн. наук, профессор

Ч-15 Чайкин, А. В., Чайкин, В. А. Научно обоснованные технологические процессы модифицирования и рафинирования чугунов и сталей для отливок ответственного назначения с использованием дисперсных материалов: монография / А. В. Чайкин, В. А. Чайкин. — СПб. : Наукоемкие технологии, 2026. — 248 с.

ISBN 978-5-00271-105-5

В монографии обобщен опыт теории и практики выплавки, рафинирования и модифицирования чугунов и сталей для отливок ответственного назначения. Изложены теоретические основы инновационных технологий модифицирования и рафинирования расплавов чугунов и сталей с применением смесевых дисперсных реагентов и модификаторов. Обоснован выбор дисперсных компонентов для разрабатываемых материалов, методы их подготовки и активации.

Разработаны и описаны технологические решения использования новых материалов в ходе плавки и внепечной обработки стали и чугунов для отливок ответственного назначения. Показана высокая эффективность их применения для повышения качественных и эксплуатационных свойств отливок.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников, занимающихся повышением качества отливок ответственного назначения, а также для студентов, обучающихся по специальностям: «Литейное производство черных и цветных металлов», «Материаловедение», «Технология машиностроения».

ISBN 978-5-00271-105-5 © Чайкин А. В., Чайкин В. А., 2026

Содержание

Предисловие авторов 6

ВВЕДЕНИЕ 7
Актуальность темы 7
Историческая справка 7

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ОБЗОР ИНФОРМАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ 13
1.1. Номенклатура ответственных отливок, требующих повышения эксплуатационной надежности, и применяемые в их производстве материалы 13
1.1.1. Достижения в производстве отливок из стали 20ГЛ повышенной эксплуатационной стойкости 24
1.1.2. Отливки из чугуна повышенной эксплуатационной стойкости для фрикционных узлов подвижного состава 26
1.1.3 Актуальность совершенствования технологии выплавки стали 110Г13Л методом переплава для производства ответственных отливок . 27
1.2. Современные достижения в области плавки, внепечной обработки, рафинирования и модифицирования сталей для отливок ответственного назначения 29
1.2.1. Плавка стали в электродуговых печах 29
1.3. Роль шлаков в выплавке стали 31
1.3.1. Преимущества вспенивания шлака во время выплавки стали 34
1.3.2. Двухшлаковая технология электроплавки 35
1.3.4. Одношлаковый процесс 37
1.4. Актуальность совершенствования технологического процесса выплавки стали в печах с кислой футеровкой 40
1.5. Применение модифицирования для повышения эксплуатационной надежности отливок ответственного назначения 43
1.6. Модификаторы для внепечной обработки чугунов для отливок 45
1.6.1. Смесевые графитизирующие модификаторы для чугунных отливок 46
Выводы по главе 1 47

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ СОСТАВОВ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ВЫПЛАВКИ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОТЛИВОК ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ 49
2.1. Обоснование выбора основных компонентов для изготовления смесевых дисперсных реагентов 49
2.2. Обоснование преимуществ раннего наведения шлака 65
2.3. Обоснование преимуществ диффузионного раскисления стали дисперсными смесями в печах с основной футеровкой 70

2.4. Обоснование преимуществ диффузионного раскисления стали дисперсными смесями в печах с кислой футеровкой 74
2.5. Обоснование рационального состава дисперсной рафинирующей смеси универсальной 77
2.6. Анализ воздействий С и Si на структуры жидкого чугуна и разработка дисперсного модификатора для высоких марок чугуна 84
Выводы по главе 2 92

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В ПЕЧАХ С ОСНОВНОЙ ФУТЕРОВКОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННЫХ ДИСПЕРСНЫХ РЕАГЕНТОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ОТЛИВОК ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ 94
3.1. Разработка технологического процесса выплавки стали 110Г13Л методом переплава с использованием дисперсных смесей при производстве ответственных железнодорожных отливок «крестовины железнодорожные» 94
3.1.1. В условиях АО «Керченский металлургический завод» 94
3.1.2. В условиях АО «Муромский стрелочный завод» 101
3.2. Разработка технологического процесса диффузионного раскисления стали с применением РДА при производстве ответственных отливок «рама боковая» и «балка надрессорная» 109
3.2.1. В Рубцовском филиале АО «Алтайвагон» 109
3.2.1.1. Совершенствование конструкции и технологии формы отливки «балка надрессорная» 109
3.2.1.2. Совершенисвтование технологии выплавки стали 20ГФЛ для отливок «рама боковая» и «балка надрессорная» 118
3.2.2. При производстве отливок «рама боковая» и «балка надрессорная» из стали 20ГЛ в электродуговых печах «ВКМ-Сталь» ... 127
3.3. Подтверждение преимуществ разработанных смесей перед традиционными раскислителями и модификаторами, применяемыми на предприятиях РФ 137
Выводы по главе 3 139

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В ПЕЧАХ С КИСЛОЙ ФУТЕРОВКОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПОСЫЛОК ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ОТЛИВОК ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ 142
4.1. При производстве стальных отливок сельскохозяйственного назначения 142
4.2. При производстве ответственных железнодорожных отливок 148
4.2.1. В Рубцовском филиале АО «Алтайвагон» 148
4.2.2. В ООО «ВКМ-Сталь» 161
4.3. На Анжерском машиностроительном заводе для нужд горнодобывающей промышленности 168
Выводы по главе 4 175

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА СЧ И ВЧ ВЫСОКИХ МАРОК ДЛЯ ОТЛИВОК ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПОСЫЛОК 177
5.1. В производстве железнодорожных отливок ответственного назначения «клин фрикционный» 177
5.2. Исследования по получению отливок «клин фрикционный» из ВЧ120 183
5.3. Преимущества комплексного графитизирующего модифицирования СЧ35 и ВЧ120 189
Выводы по главе 5 190
ГЛАВА 6. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОИЗВОДСТВО 191
6.1. Внедрение технологического процесса диффузионного раскисления сталей с применением РДА 191
6.1.1. Расчет ожидаемого экономического эффекта от внедрения раскислительной смеси алюмосодержащей (РДА) 193
6.2. Внедрение разработанных технологий и материалов при выплавке сталей 110Г13Л методом переплава 194
6.3.1. В ОАО «Копейский машиностроительный завод» 197
6.3.2. На Анжерском машиностроительном заводе (ОАО «Анжеромаш») 200
6.4. Освоение разработанных технологий и материалов при производстве отливок «клин фрикционный» из чугунов, СЧ35 и ВЧ 120 ... 201
6.4.1. Освоение производства отливок «клин фрикционный» марки СЧ35 и разработка технологии изготовления отливок из ВЧ..... 201
6.4.2. Разработка технологии производства отливок из высокопрочного чугуна с выплавкой в индукционной печи..... 207
6.4.3. Освоение производства отливок «клин фрикциоый» из ВЧ 120 с выплавкой чугуна в электродуговой печи..... 213
Выводы по главе 6 216
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 219
ЭПИЛОГ. Андрей Чайкин. Ода металлургам и литейщикам..... 224
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 225

Предисловие авторов

Так случилось, что в этом, 2026 году мы отмечаем сразу два юбилея династии Чайкиных в литейном производстве. Пятьдесят лет — у Чайкина Владимира Андреевича и двадцать лет — у Чайкина Андрея Владимировича.

Когда подводишь итоги пути длиною в жизнь, невольно задумываешься о странной алхимии времени и выбора. Наш общий путь в литейном производстве — это не просто семьдесят лет сложенных вместе календарей. Это единый сплав, где опыт отца стал легирующей добавкой к активности сына, а семейное дело превратилось в диалог эпох, ведущийся на универсальном языке формул, графиков и шепота остывающего металла.

Пятьдесят лет назад (в 1976 г.), получив диплом с отличием инженера-металлурга Запорожского машиностроительного института, я, Владимир Андреевич, стоял на пороге мира, где жар печи, расчет и холодная логика чертежа были частями одного целого. Немаловажную роль в те времена играла и интуиция специалиста литейщика. Мое поколение строило промышленный каркас Великого и могучего СССР, и каждый ковш расплава, каждая удавшаяся уникальная отливка были не просто производственным заданием — это была победа человеческой мысли ради созидания.

Двадцать лет назад (в 2006 г.) я, Чайкин Андрей Владимирович надел такую же, но уже обновленную мантию инженера-литейщика, окончив МГТУ им. Баумана в совсем другой стране — Российской Федерации. Другим стало и литейное производство. Оно уже не вмещается в рамки литейного цеха. Это сложная система, где энтропия сопротивления материалов сталкивается с энтальпией человеческого гения. Это пространство, где физика перетекает в философию, а технологический процесс становится метафорой творения. Мой взгляд — это взгляд внутрь явления, попытка увидеть в кристаллической решетке поэзию, а в потоке металла — нарратив.

В этой книге мы не просто суммировали наши знания. Мы провели своеобразную металлургическую реакцию наших опытов, надеясь, что ее результатом станет нечто большее, чем сумма частей: искра понимания для коллег, опора для студентов и, возможно, новый вектор мысли для всей отрасли.

Мы верим, что истинное литейное искусство лежит на стыке, где наука встречается с ремеслом, дисциплина — с вдохновением, а наследственность — с новаторством. Именно этому пересечению и посвящены страницы этой монографии. Пусть наш скромный труд станет не памятником, а новой литейной формой, из которой будут черпать знания, совершенствовать и приумножать их следующие поколения. Ведь династия — это не титул, а ответственность. Ответственность за то, чтобы передать дальше не просто знания, но и огонь любви к своему делу.

С глубочайшей признательностью
нашим учителям, коллегам, друзьям и семье,
Владимир Андреевич и Андрей Владимирович Чайкины

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Литейное производство РФ является основной заготовительной базой машиностроительного комплекса, прогресс которого неразрывно связан с качеством литья [1]. Доля литых деталей из черных и цветных сплавов в машинах и механизмах составляет 40–50%, а в металлообрабатывающих станках и кузнечно-прессовом оборудовании — до 70% по массе [2]. Наряду с этим литейное производство обеспечивает получение сложных по геометрии и конфигурации литых заготовок с внутренними полостями, что практически невозможно получить другим способом. Поэтому литейное производство, безусловно, сохранит свое лидирующее положение среди других заготовительных производств [3]. Для повышения конкурентоспособности литых заготовок необходимо повышать эксплуатационную надежность ответственных отливок из стали и чугуна их способность выдерживать возрастающие нагрузки [1]. В связи с этим растет роль разработки и внедрения в производственный процесс новых технических и технологических решений по предварительной обработке расплавов сталей и чугунов перед заливкой их в литейные формы для повышения их эксплуатационной надежности [1–7]. Перспективными для этих целей являются материалы, для изготовления которых целесообразно использовать дисперсные компоненты. Это открывает широкие возможности для получения новых рафинирующих и модифицирующих присадок, имеющих большой потенциал для повышения их эффективности и сокращения удельных расходов.

Историческая справка

В отечественной практике большой вклад в развитие научных основ повышения физико-механических и эксплуатационных свойств ответственных отливок из стали внесли такие исследователи и ученые, как Ю. А. Нехендзи, П. И. Бидуля, А. А. Рыжиков, Л. Я. Козлов, К. Н. Вдовин, В. М. Колокольцев, Г. А. Косников, Ри Хосен и др. Для достижения цели эти ученые традиционно применяли легирование и микролегирование сталей для различных по конфигурации и массе отливок и внесли неоценимый вклад в становление сталелитейной промышленности. Их фундаментальные труды обобщены и опубликованы в монографиях и служат хорошими учебными пособиями [8, 9, 10].

Такие ученые, как В. И. Явойский, Л. Я. Поволоцкий, Ю. А. Шульте, В. В. Лунев, И. В. Рябчиков, В. А. Коровин и др., активно внедряли модифицирование как эффективный метод повышения качества сталей и долговечности отливок. Их усилиями за более чем полувековую историю развития модифицирования разработаны модификаторы для стали на основе ЩЗМ и РЗМ и технологические процессы внепечной обработки сталей. Результаты модифицирования стали определяют главным образом

содержанием активных элементов как в жидком металле, так и в отливке. Анализ физико-химических свойств элементов, применяемых для модифицирования стали, показал, что для внепечной обработки наиболее приемлемыми является силикокальций. Из ЩЗМ перспективен также барий, так как он не нуждается в защите от испарения, поскольку температура его кипения выше температуры жидкой стали [11]. По химическому сродству к кислороду и сере РЗМ значительно превосходят другие раскислители и являются активнейшими деоксидаторами и десульфураторами. Чаще всего модификаторы производят на основе кремния, реже — на основе алюминия [11, 12]. Фундаментальные труды вышеперечисленных ученых являются основой для разработки и внедрения в производство эффективных технологий внепечной обработки стали для повышения эксплуатационных свойств отливок.

Тем не менее многие ответственные отливки и прежде всего детали для нужд РЖД, горнодобывающей техники, механизмов, работающих в условиях Крайнего Севера, требуют соответствия постоянно растущим современным требованиям. Это свидетельствует о необходимости продолжения исследований в данном направлении. При этом приоритет следует отдать комплексным методам печной и внепечной обработки сталей для литых заготовок новыми материалами на основе дисперсных порошков.

Многие ученые внесли свой вклад в повышение качества, надежности и долговечности отливок из серого и высокопрочного чугунов. Это К. И. Ващенко, Н. Г. Гиршович, Я. Е. Гольдштейн, А. А. Жуков, Е. В. Ковалевич, С. В. Давыдов.

Ими установлено, что для достижения этой цели наиболее надежный способ — модифицирование расплава. Это универсальный, относительно дешевый, технологически гибкий и высокоэффективный метод управления структурой кристаллизующегося сплава. Многие ученые идут по пути усложнения составов модификаторов, что обусловило наличие свыше 500 действующих их типов, содержащих от 2–3 до 15 компонентов. Это удорожает материалы и не всегда приводит к искомому результату.

Для резкого повышения результатов модифицирования с одновременным уменьшением расхода модификаторов целесообразно применять дисперсные компоненты. Дисперсность существенно увеличивает удельную поверхность частиц смеси и резко повышает ее реакционную способность. Ряд ученых подтвердил эффективность порошков при модифицировании чугунов. Так, Е. В. Ковалевич [13] при производстве высокопрочного чугуна рекомендует в качестве модификатора использовать механическую смесь порошков чистого магния или его сплавов с ферросилицием или другими замедлителями реакции взаимодействия магния с чугуном, а также все существующие в настоящее время магнийсодержащие лигатуры, которые можно размельчить до мелкодисперсного состояния. При повышении температуры по мере прогрева модификатора частицы магния, находящиеся в поверхностном слое, начинают испаряться, образуя пузырьки

газообразного магния. В результате этого усиливается активное проникновение чугуна вглубь модификатора за счет разрушения и взрыхления поверхностных слоев модификатора, облегчая проникновение чугуна в промежутки между частицами. В результате весь модификатор послойно, слой за слоем, вступает в реакцию с чугуном и полностью с ним реагирует.

С. В. Давыдов разработал дисперсный модификатор Glitter, в основе которого находятся ПАЭ подгрупп Va и VIa таблицы Менделеева, а также Al, Sb, Sn, Cu и другие элементы [14]. Модификатор Glitter эффективно влияет на кристаллизацию не только графитной фазы, но и на фосфидную эвтектику, и на первичное зерно чугуна, и на фазу НВ, активизируя последнюю в качестве дополнительных гетерогенных центров графитизации. Основные результаты НМ: полная модифицируемость низкотемпературных доменных и ваграночных чугунов при температуре жидкого чугуна 1180–1280 °С, повышение прочностных свойств чугуна на 2–3 марки, ликвидация усадочных явлений любой природы, полная перлитизация матрицы чугуна, стабилизация и повышение твердости на 20–30%, что улучшает механическую обработку чугуна.

И, наконец, В. Т. Калинин применил в качестве модификаторов ультрадисперсные материалы (УДМ), в основу которых положены частицы SiC, A1N, TiN, TiCN и ряд других с размерами от 50 до 500 нм [15]. Он разработал технологические процессы ковшового модифицирования УДМ чугуна для отливок металлургического оборудования, позволившие значительно сократить расход модификаторов, повысить механические и служебные свойства литых изделий.

Работы вышеперечисленных ученых позволили значительно сократить расход модификаторов и существенно повысить механические и служебные свойства литых чугунных изделий.

Следует отметить, что особый интерес представляют смесевые дисперсные модификаторы, которым в настоящее время уделяется недостаточное внимание. Использование смесевых модификаторов дает возможность включить в их состав свободный углерод (графит, порошок графитизированных электродов) или связанный углерод (карбид кремния), образующий при взаимодействии с высокотемпературным расплавом свободный углерод [16]. Еще одним достоинством смесевых модификаторов является возможность готовить их с узкими разбегами концентраций элементов. Их преимущества по сравнению с комплексными модификаторами на железокремниевой основе проявляются в результате меньшего прироста общего содержания кремния в сплаве и повышения содержания углерода в чугуне. Смесевые модификаторы предотвращают отбел, повышают прочность, твердость, плотность и износостойкость чугуна, обеспечивают однородность структуры и свойств в разностенных отливках. Разброс твердости НВ составляет 10–15% при повышении уровня твердости в толстых сечениях на 20 ед. Такие модификаторы весьма эффективны и в производстве

ответственных отливок с массивными частями, затвердевающими длительное время, для обеспечения заданной однородной структуры и свойств [17].

Таким образом, для выплавки и внепечной обработки расплавов разработка новых смесевых материалов на основе дисперсных порошков и технологических процессов использования их в производстве является перспективным направлением для повышения механических свойств и повышения срока службы ответственных отливок из чугуна и стали.

Целью работы является разработка новых технологических процессов выплавки и внепечной обработки чугунов и сталей, обеспечивающих повышение эксплуатационной надежности ответственных отливок за счет применения смесевых дисперсных реагентов.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Теоретически обоснованы повышение реакционной способности компонентов смесей за счет их диспергирования и рациональные компонентные составы модификаторов, раскислительных и рафинирующих смесей для печной и внепечной обработки сталей и чугунов, повышающих механические и служебные свойства отливок ответственного назначения.

2. На все созданные материалы разработаны технические условия; ТУ 24.10.12-002-52044633-2025. Модификатор КСК и рафинирующие смеси на его основе для литейного и металлургического производства; ТУ 24.10.12-007-52044633-2016. Раскислительные и рафинирующие смеси для литейного и металлургического производства; ТУ 24.10.12-001-52044633-2025. Модификаторы комплексные, науглероживатели, раскислительные смеси для литейного и металлургического производства. Технические условия зарегистрированы в Центре стандартизации и метрологии. Все разработанные материалы размещены в банке данных «Продукция России», который ведет ФГУП «Стандартинформ». Материалы и разработанные способы их применения запатентованы.

3. В ООО «Металлург» СОАЛ создан участок по производству вновь созданных материалов мощностью 1200 т/год по разработанным ТУ, а именно: модификаторы типа МК, флюс РШ, рафинирующая смесь РСУ, РДА и другие. В 2024 г. произведено и реализовано продукции в количестве 1045 тонн. Выручка составила —71,2 млн рублей. Уплачено налогов и сборов в казну государства 10,9 млн рублей. За счет реализации продукции в 2024 году на предприятиях РФ получен экономический эффект в 53 683 000 (пятьдесят три миллиона шестьсот восемьдесят три тысячи) рублей.

Методология и методы исследования

Теоретико-методологическую основу исследования составили труды отечественных и зарубежных ученых, занимающиеся процессами выплавки и внепечной обработки чугунов и сталей. Методология строилась на

экспериментальных исследованиях, проводимых в условиях литейных предприятий, обладающих современным оборудованием и технологиями. Аналитические исследования осуществлялись в условиях аттестованных лабораторий литейных цехов, располагающих новейшими приборами. Методология исследования включает в себя следующие методы.

Определение гранулометрического состава порошковых материалов при помощи разработанной специальной методики, основанной на широко используемой в литейном производстве методике, предусматривающей рассев частиц на стандартных ситах производства фирмы ООО «Литмашприбор». Для определения среднего значения размеров частиц к результатам рассева порошков с высокой дисперсностью применили правило академика А. Н. Колмогорова. Подробно методика описана в монографии [18]. Для проверки точности определения гранулометрического состава с помощью разработанной методики использовали лазерный дифракционный микроанализатор Analysette 22 COMFORT производства фирмы FRITSCH (Германия), работающий на основе дифракции сходящегося лазерного луча и являющийся одним из наиболее точных на сегодняшний день приборов. Диапазон измеряемых размеров частиц от 0,1 до 1250 мкм.

Для приготовления смесей использовали смеситель турбулентный С 2.0. Конструкция смесителя обеспечивает высокую однородность смешивания масс частиц материала за счет придания им турбулентного характера движения.

Измельчение материалов осуществляли в лабораторной вибромельнице с твердосплавной размольной гарнитурой «Эталон 0,5×6». Для сушки исходных порошков использовали вакуумный сушильный шкаф СНВС-4,3.4,3.4,9/3-И2-Ф.

Исследования химического анализа исходных компонентов и смесей проводили на анализаторе рентгенофлуоресцентном ElvaX ProSpector 2. Диапазон определяемых элементов у прибора от магния до урана. Для анализа смесей использовали программу «Анализ оксидов». Для определения химического состава металла использовали спектрометр Foundry-Master EXPERT, который успешно работает как в цехах для контроля качества металлов и сплавов на стадии производства, так и в лабораториях — для контроля готовой продукции. Анализатор обеспечивает высочайшую точность результатов за счет использования новых технологий производства, увеличения диапазона длин волн, что позволяет анализировать практически все элементы, включая азот в сталях. Он идеально подходит для быстрого и наиболее точного анализа в условиях литейного производства, а также на входном контроле. Для определения концентраций серы и углерода использовали газоанализатор модели CS-230, предназначенный для измерения массовой доли серы и углерода в черных, цветных металлах, сталях, сплавах и в других неорганических материалах. Анализаторы оснащены программным обеспечением, позволяющим осуществлять градуировку анализатора с помощью стандартных образцов фирмы LECO Corporation, контроль процесса

измерений, сохранять результаты измерений, проводить их статистическую обработку и архивирование.

Обеспечение инновационного развития литейного производства связывается с необходимостью вовлечения моделирования в его процессы, Незаменимыми в этом смысле являются компьютерные системы общего назначения. Одной из таких систем является программа из области вычислительной гидродинамики FLOW-3D®, которая хорошо адаптирована для литейного производства и существенно расширяет круг моделируемых задач в данной области. С помощью программного комплекса FLOW-3D впервые моделировали процессы поведения частиц в расплаве при заполнении им полости литейной формы; в гидродинамическом пакете общего назначения проводили моделирование процесса удаления оксидов алюминия с помощью флотации, всплывающими в металлическом расплаве, пузырьками рафинирующего газа;

Принятая методология предусматривает получение большого количества экспериментальных данных. В свою очередь, это открывает широкие возможности для использования статистического и регрессионного анализов. Это дает возможность увидеть взаимодействие фактов и установить закономерности, выявить типичные признаки ситуаций, сценарии развития, обосновать прогноз [178]. Чем больше накапливается результатов экспериментов, тем точнее и объективнее результаты анализа. В работе применили сборник программ «Статистика и анализ» версии 12.0 с проверкой адекватности моделей с заданным уровнем значимости 0,05 с помощью соответствующих статистических критериев согласия, параметрических и других [177].

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ОБЗОР ИНФОРМАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1.1. Номенклатура ответственных отливок, требующих повышения эксплуатационной надежности, и применяемые в их производстве материалы

Особое место в отливках ответственного назначения занимают заготовки для нужд РЖД. Правительство РФ поставило задачу перед РЖД кардинально повысить эксплуатационную надежность и эффективность отечественного железнодорожного транспорта [19]. Для этого необходимо конструировать новые вагоны, существенно превосходящие нынешнее поколение по многим техническим характеристикам [20, 21]. Основная нагрузка в данном случае ложится на тележки грузовых вагонов, обеспечивающие их движение, служащие для опоры кузова на рельсы и для передачи, восприятия и амортизации динамических нагрузок между кузовом вагона и рельсами. Необходимо создать принципиально новые тележки с повышенной нагрузкой на ось в 25 тс [22–25]. В РФ широкое распространение получила тележка модели 18–100. Это надежный и проверенный временем механизм, за время использования которого нагрузка на ось была увеличена с 21 до 23,5 тс. Отечественные заводы, такие как АО «Алтайвагон», «Промтрактор», ПО «Брянский машиностроительный завод» и другие, производят подобные тележки, которые являются подобием эксплуатируемых в США тележек Барбера [26], но уступают ей [27]. В связи с этим в настоящее время остро назрела необходимость создания принципиально новых отечественных тележек с нагрузкой на ось 25 тс с указанной нагрузкой [28, 29], т. к. железнодорожные пути ОАО «РЖД» допускают возможность эксплуатации вагонов с повышенной грузоподъемностью и осевой нагрузкой 25 тс и выше.



Рисунок 1.1. Отливка «рама боковая»

При этом повышаются требования к литым деталям вагонных тележек, которые должны обеспечить требуемую несущую способность последних. Это прежде всего самые нагруженные элементы тележки — надрессорные балки и боковые рамы (рис. 1.1, 1.2), корпуса фрикционные с увеличенным коэффициентом запаса сопротивления усталости.



Рисунок 1.2. Отливка «балка надрессорная»

Учитывая вышесказанное, РЖД разработал специальный ГОСТ 32400, в котором отражены требования к отливкам рам и балок [30]. Эти требования приведены в табл. 1.1, 1.2.

Таблица 1.1

Химический состав сталей для отливок «рама боковая», «балка надрессорная» по ГОСТ 32400

Марка стали	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	V	Al	S	P	Cr	Ni	Cu
						Не более				
20ГФЛ	0,17–0,25	0,30–0,50	0,9–1,4	0,07–0,13	0,02–0,06	0,02	0,02	0,3	0,3	0,6
20ГЛ	0,17–0,25	0,30–0,50	1,1–1,4	–	0,02–0,06	0,02	0,02	0,3	0,3	0,6

Таблица 1.2.

Механические свойства стали для отливок «рама боковая» и «балка надрессорная» по ГОСТ 32400

Категория свойств	Предел текучести, $\sigma_т$, МПа	Временное сопротивление, $\sigma_в$, МПа	Относительное удлинение, δ, %	Относительное сужение, ψ, %	Ударная вязкость, KCV^{-60}, кДж/м^2
1	300	500	20	35	200*
2	343	510	18,0	30,0	
* с 01.01 2016 года					

Отливки изготавливаются из низколегированных сталей 20ГЛ и 20ГФЛ. Чтобы обеспечить эксплуатационную надежность отливок ГОСТ 32400 требует низкого содержания Р и S в стали. Кроме того, необходимо обеспечить

ударную вязкость с острым надрезом при температуре –60 °С не ниже 200 кДж/м^2. Для этого, согласно ГОСТ, рамы и балки должны быть отлиты из стали, выплавляемой только в печах с основной футеровкой. Вместе с тем производителям дается возможность дополнительно использовать раскислители, модификаторы и рафинировать жидкий металл. Это облегчает сложную задачу и позволяет для ее решения разработку и внедрение новых технологических процессов и материалов.

Кроме вышеуказанных деталей, заслуживают внимание ответственные отливки для автоматической сцепки железнодорожных вагонов, являющейся центрально-буферным ударно-тяговым сцепным прибором для взаимного автоматического сцепления единиц подвижного состава, происходящего при нажатии или ударе одной из единиц состава о другую (рис. 1.3) [31].



Рисунок 1.3. Автосцепка

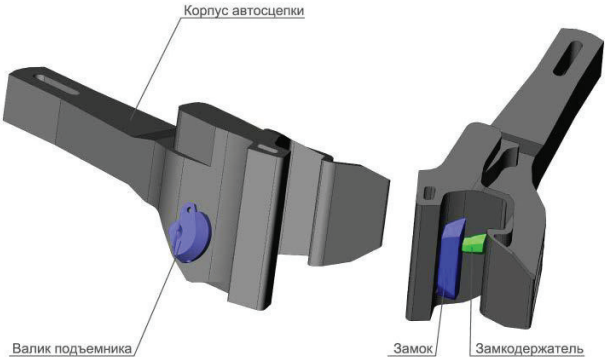


Рисунок 1.4. Корпус автосцепки с деталями механизма сцепления

Эти отливки изготавливают также из низколегированной стали 20ГЛ. Их разделяют на три группы. Наиболее ответственные из них — корпус автосцепки и тяговый хомут — относятся к деталям первой группы. Корпус, являющийся основной частью автосцепки, предназначен для передачи колоссальных тяговых и ударных нагрузок, а также размещения деталей механизма сцепления (рис. 1.4).

Тяговый хомут служит для передачи больших тяговых усилий от автосцепки на поглощающий аппарат посредством клина.

Детали должны быть термически обработаны:

– детали первой группы и замок подвергаются закалке в воде и высокому отпуску;

– детали второй и отливки третьей групп — нормализации.

Требования к отливкам (химический состав и механические свойства) определяются ГОСТ 22703 [32] и приведены в табл. 1.3 и 1.4.

Таблица 1.3

Химический состав стали

Марка стали	Содержание элементов, % по массе						
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	V
20ГЛ	0,17–0,25	1,10–1,40	0,30–0,50	0,30	0,30	0,30	–

Таблица 1.4

Механические свойства стали деталей различных групп

Наименование и обозначение показателя	Значение показателя для деталей в зависимости от предела текучести $\sigma_т$, МПа, не менее				
	для деталей первой группы		для деталей второй группы		для деталей третьей группы
	от 450 до 500 включ.	св. 500	от 295 до 345 включ.	св. 345	314 и более
Временное сопротивление $\sigma_в$ МПа	500	600	490	510	510
Относительное удлинение δ, %	15	12	20	18	17
Относительное сужение Ψ, %	30	25	30	25	25
Ударная вязкость при температуре –60 °С, KCU^{-60} Дж/см^2	25	25	–	–	25
Ударная вязкость при температуре –60 °С на образцах с острым надрезом, KCV^{-60} Дж/см^2	15	15			

Как видно из данных табл. 1.4, для наиболее ответственных отливок первой группы обязательным является определение KCV^{-60}. Это наиболее структурно чувствительная величина. Для ее обеспечения ГОСТ 22703 требует, чтобы суммарное содержание серы и фосфора не превышало 0,06%. Сталь при выплавке допускается обрабатывать раскислителями и модификаторами. Вид и способ обработки стали раскислителями, модификаторами, а также их число устанавливает предприятие-изготовитель. Таким образом, для исполнения требований существует возможность и необходимость разработки новых технологических процессов рафинирования расплавов и материалов для них.

Немаловажную роль в тележке грузового вагона играет один из основных узлов, предназначенный для снижения колебаний кузова вагона и уровня динамических сил в вертикальной и горизонтальной плоскости. Таким узлом является рессорное подвешивание с клиновыми фрикционными гасителями колебаний. Работоспособность деталей, входящих в этот узел, является основным фактором, влияющим на величину межремонтного пробега тележки грузового вагона [33–35]. При этом фрикционный клиновой гаситель колебаний в процессе эксплуатации характеризуется нестабильностью работы. Создаваемая им сила трения для гашения вертикальных и горизонтальных колебаний кузова вагона со временем уменьшается вследствие износа рабочих поверхностей отливки фрикционного клина, контактирующих с опорной поверхностью надрессорной балки и поверхностью фрикционной планки, что приводит к увеличению динамических сил, действующих на вагон и путь. Поэтому отливка «клин фрикционный» является основной деталью узла, от которого зависит его эксплуатационная надежность (рис. 1.5) [35].

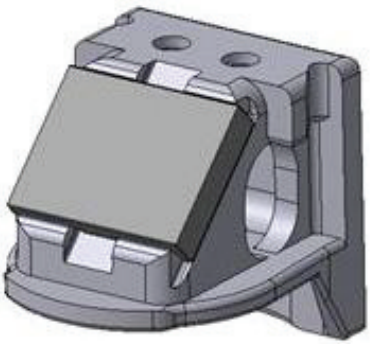


Рисунок 1.5. Отливка «клин фрикционный»

Учитывая вышесказанное, особый интерес у исследователей вызывает конструкция и материал фрикционного клина, являющегося быстро изнашиваемой деталью. Материалы, позволяющие повысить

эксплуатационную надежность отливки, являются чугуны высоких марок СЧ30, СЧ35 и высокопрочный чугун ВЧ120. Для организации производства фрикционных клиньев из чугунов высоких марок СЧ30, СЧ35 и высокопрочного чугуна ВЧ120 в РФ были разработаны соответствующие нормативные документы: чертежи и технические условия [264]. Наиболее полная регламентация параметров производства и качества фрикционных клиньев приведена в разработанных ОАО «ВНИИЖТ» ТУ 3183-234-01124323 для отливок из СЧ30 и СЧ35, а также ТУ 3183-163-01124323 из ВЧ 120 [37, 270]. Так, у литых клиньев из СЧ30 $\sigma_в$ должен быть ≥300 МПа, а у СЧ35 — $\sigma_в$≥350 МПа Химический состав чугуна приведен в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Элементный состав чугунов СЧ30, СЧ35 для отливок «клин фрикционный»

Марка чугуна	Механические свойства		Химический состав, % по массе							
	σв, МПа,	НВ	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
						Не более				
СЧ 30	≥300	197–260	3,0–3,2	1,3–1,9	0,7–1,0	0,2	0,12	0,4	0,4	0,4
СЧ35	≥350	230–275	2,9–3,0	1,2–1,5	0,7–1,0	0,2	0,12	0,4	0,4	0,4

Для обеспечения механических свойств и эксплуатационной надежности отливок чугун в отливках должен быть перлитным. Важно отметить, что в боковых и наклонных стенках отливки не допускается наличие цементита. Это очень сложно обеспечить с химическим составом чугунов, отличающимся низким углеродным эквивалентом и конструктивными особенностями отливки. Для решения этой задачи требуется разработка нового эффективного модификатора и технологии модифицирования чугуна.

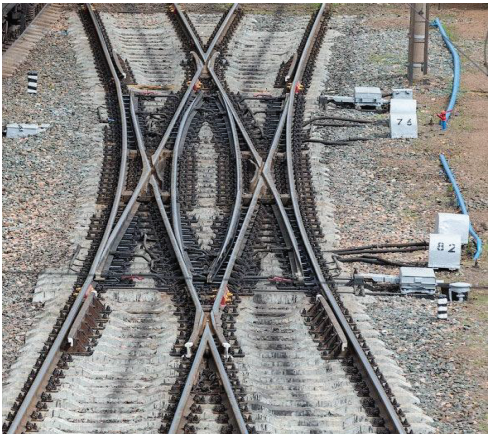


Рисунок 1.6. Крестовины и стрелочные переводы

И, наконец, чтобы обеспечить возрастающие железнодорожные перевозки, создать условия для наиболее эффективного использования всех преимуществ железнодорожного транспорта, поднять скорости движения и вес поездов, необходимы опережающие темпы развития железнодорожного пути, его усиления и совершенствования. Самым ответственным звеном в этом случае являются крестовины железнодорожные и стрелочные переводы — устройства, служащие для перевода подвижного состава с одного пути на другой (рис. 1.6) [38].

Эти особо ответственные железнодорожные отливки изготавливаются из стали 110Г13Л по ГОСТ 7370 [39]**.** Химический состав отливок представлен в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Содержание элементов в стали 110Г13Л по ГОСТ 7370

Содержание элементов, % по массе				
C	Mn	Si	P	S
			не более	
1,00–1,30	11,50–16,50	0,30–0,90	0,090	0,020

Высокие требования предъявляются к механическим свойствам материала. По ГОСТ 7370 они не могут быть ниже минимальных требований, указанных в табл. 1.7. По низшему из показателей механических свойств определяют группу металла. В микроструктуре отливок должен присутствовать аустенит без карбидов.

Таблица 1.7

Механические свойства отливок из стали 110Г13Л

Показатель	Показатели механических свойств для группы стали		
	1	2	3
σ_B Н/мм (кгс/мм)	Более 883 (90)	Более 785 (80) до 883 (90) включительно	Более 687 (70) до 785 (80) включительно
σ_T, Н/мм (кгс/мм), не менее	353 (36)	353 (36)	353 (36)
δ, %	Более 30	Более 25 до 30 включительно	Более 16 до 25 включительно
ψ, %	Более 27	Более 22 до 27 включительно	Более 16 до 22 включительно
KCU^{+20}, Дж/см (кгс·м/см)	Более 245 (25,0)	Более 196 (20) до 245 (25) включительно	Более 167 (17) до 196 (20) включительно

Как видно из данных табл. 1.7, механические свойства стали высоки даже для отливок третьей группы качества. Особенно это касается ударной вязкости стали. Обеспечить такие механические свойства очень непросто. Учитывая возрастающие требования РЖД к неуклонному усилению

железнодорожных путей, необходимо совершенствование технологического процесса производства крестовин железнодорожных и стрелочных переводов.

В последние годы приобретает особую актуальность проблема хладостойкости материалов ответственных отливок в связи с освоением Северных территорий, Арктики и нефтяных месторождений морского шельфа Северного Ледовитого океана. Это связано с резким снижением эффективности работы оборудования и транспорта в зимнее время в этих районах. Анализ работы автохозяйств зоны с суровым климатом показал, что срок службы автомобилей в этой зоне по сравнению с европейской частью страны сокращается в 2 раза, а аварии и поломки, связанные с климатическими условиями, выводят из строя до 25% парка машин. Поток отказов (по сравнению с летним периодом) деталей тракторов и бульдозеров увеличивается в зимнее время в 2–6 раз, деталей экскаваторов — в 5–7 раз. Важнейшим фактором развития техники низких температур является создание и внедрение надежных материалов, пригодных для работы в этих условиях, обеспечивающих повышение долговечности отливок, изготовленных из этих материалов [40, 41].

ГОСТ 21357 [42] определяет требования к ответственным отливкам из хладостойкой стали. В качестве материалов для изготовления отливок предусматривается и низколегированная сталь 20ГЛ. К ответственным хладостойким отливкам относят корпусные детали трубопроводной арматуры высокого уровня качества для магистральных нефте- и газопроводов, изготавливаемые из стали 20ГЛ по ГОСТ 33260 (рис. 1.7, 1.8) [43].



Рисунок 1.7. Нефтепровод с запорной арматурой с температурой транспортировки от –60 °С



Рисунок 1.8. Кран шаровой-1400 для магистральных газопроводов для транспортировки природного газа с температурой от –60 до 80 °С

Для деталей арматуры, эксплуатируемой в макроклиматическом районе с холодным климатом, обязательным условием является определение ударной вязкости. При этом KCU^{-60} должно быть >300 кДж/м^2 (3,0 кгс·м/см^2), а KCV^{-60}>200 кДж/м^2 (2,0 кгс·м/см^2). Концентрации серы и фосфора в стали не должны превышать по 0,02%. ГОСТ рекомендует соблюдать особенности технологии выплавки и конечного раскисления хладостойкой стали с гарантированной ударной вязкостью при температуре минус 60°С, требуемой стандартом. Сталь выплавляют в дуговых электропечах с основной футеровкой двух шлаковым процессом с использованием стандартных ферросплавов. Основность шлака в электродуговых печах в восстановительный период должна быть в пределах 2,5–3,0. К моменту выпуска основность шлака должна быть не менее 2,5, а содержание закиси железа — не более 0,6–0,8%. Для повышения уровня и стабилизации ударной вязкости при температуре –60 °С рекомендуется дополнительно модифицировать и рафинировать сталь ЩЗМ и РЗМ или другими добавками на усмотрение изготовителя.

Требованиям ГОСТ 21357 должны отвечать ответственные литые детали автосцепного устройства и тележки грузовых вагонов.

Также в перечень ответственных отливок включены отливки из стали 110Г13Л: зубья ковшей экскаваторов (рис. 1.9), рабочие органы дробильного оборудования (рис. 1.10), гусеничные звенья и другие, работающие в условиях низких температур.

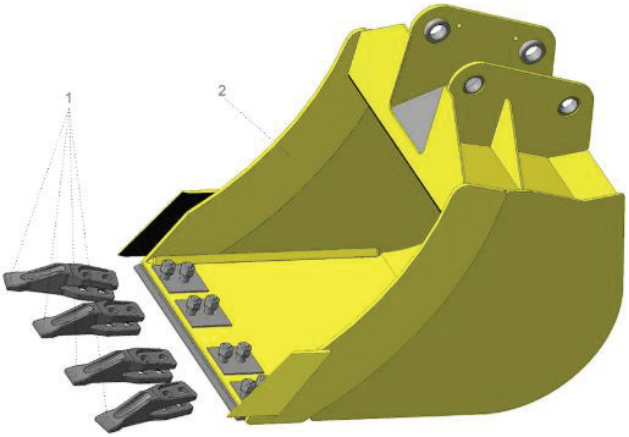


Рисунок 1.9. Ковш экскаватора с зубьями: 1 — зубья ковша; 2 — ковш



Рисунок 1.10. Конусы дробилок

Требует повышения эксплуатационной надежности и горно-шахтное оборудование и, соответственно, ответственные отливки для них. На рис. 1.11 показан проходческий комбайн.



Рисунок 1.11. Проходческий комбайн

Наиболее нагруженным рабочим механизмом в комбайне является стреловидный исполнительный орган. Самые высокие динамические нагрузки при работе стреловидного механизма испытывают литые детали «корпус турели», предназначенной для поворота стреловидного исполнительного органа, и «опора» для двух роликовых радиально-сферических однорядных подшипников. Крупногабаритные отливки «корпус турели» и «опора» изготавливаются из конструкционной легированной стали 35ХМЛ. Большие динамические нагрузки при работе комбайна испытывают также редукторы питателя. Корпуса и крышки редукторов выполняются литыми из конструкционной легированной стали 25ГСЛ по ТУ 24-1-12-181-75. Исходя из вышесказанного, повышение механических свойств вышеперечисленных отливок ответственного назначения весьма актуально. Это позволит повысить эксплуатационную надежность комбайна.

1.1.1. Достижения в производстве отливок из стали 20ГЛ повышенной эксплуатационной стойкости

Анализ литературных источников, где изучалась надежность работы деталей для нужд РЖД, запорной арматуры из стали 20ГЛ, а также деталей из стали 110Г13Л, работающих в условиях низких температур, показывает, что рост надежности их работы в условиях Крайнего Севера и Сибири требует повышения механических свойств, и в первую очередь хладостойкости. Многие исследователи работают над этой проблемой [44, 45, 46].

Хрупкое разрушение материалов при отрицательных температурах является одной из главных проблем. Как показали исследования ряда авторов, оно является основной причиной высокой аварийности машин и механизмов при отрицательных температурах. Поэтому к деталям, работающим в условиях низких температур, предъявляют все более высокие требования. Для материала литых корпусов задвижек на нефтепроводах, которые в последнее время разрушаются в зимнее время, ГОСТ 33260 установил требования для KCV при –60 °С не менее 245 кДж/м^2. В настоящее время в этом направлении ведутся работы [36].

Фирма Siemens, например, повысила требования к материалу для литых заготовок для «Северного потока». Для высокопрочного чугуна с графитом по американскому стандарту ASTM установлены требования по KCV при –40 °С в пределах 9–12 Дж/см^2. До этого таких требований к свойствам чугуна не было [36].

Но особое место в отливках ответственного назначения занимают заготовки для железнодорожного транспорта. Поэтому разработки и промышленное внедрения новых материалов и технологий, направленных на повышение качества и конкурентоспособности стали и сплавов для железнодорожного транспорта, особенно актуальны. Рассмотрим достижения литейщиков в этой области.

Наряду с существенными конструктивными недостатками тележки 18–100, материалы, из которых изготавливали литые детали для тележки, не обеспечивали современных требований к эксплуатационной надежности отливок. Поэтому на всех заводах, производящих тележки вагонов, ведутся работы по разработке и внедрению инновационных конструкций литых деталей и материалов для них. Высококачественное литье должно выгодно отличаться от аналогов для выпускаемой в настоящее время модели тележки 18–100. ОАО «НВЦ «Вагоны» проводят ходовые испытания полувагонов на новых тележках с усиленными литыми деталями на соответствие требованиям нормативов [47].

Отливки для тележки модели 18-100 в начале 2000-х не обеспечивали надежности конструкции. Согласно действующему в то время ОСТ 32.183–2001 (ОСТ), разработанному ГУП ВНИИЖТ, отливки балки и рамы изготавливали из низколегированных марок сталей 20ГФЛ, 20ГЛ, 20ГТЛ, а также комплексно-легированной стали марки 20ХГНФТЛ. Недостатком ОСТ 32.183

являлись заниженные требования к механическим свойствам стали. И без того низкий допустимый KCV^{-60}, равный 167 кДж/м^2, не являлся браковочным признаком и практически на заводах не определялся. Ударная вязкость KCU^{+20} определялась по требованию заказчика. В результате боковые рамы и балки надрессорные, производимые в РФ, имели коэффициент запаса прочности, равный 1,2, что в два раза ниже, чем в США на то время [48]. Срок службы вышеперечисленных отливок в США достигал 50 лет. ОСТ 32.183 предусматривал срок службы только 32 года [49]. Вместе с тем до назначенного срока службы в реальных условиях (при оптимальной загрузке вагонов и при стабильном ремонтном процессе) дорабатывали менее 1/4 надрессорных балок и боковых рам. Постоянно существовала вероятность излома деталей в пути следования. В 2014 году на сети из-за изломов боковых рам тележек произошло 13 сходов вагонов, из них 4 крушения и 1 авария.

По характеристикам механических свойств и показателям ударной вязкости эти марки сталей близки к зарубежным аналогам, отраженным в стандарте М-201, который разработан Ассоциацией Американских железных дорог и распространен на отливки из углеродистой и легированной стали для оборудования вагонов и локомотивов, маркированных A, B, B+, C, D и E [50]. Однако имеет место существенное отличие. За рубежом в марках стали B и B+, из которых отливают рамы боковые и балки надрессорные регламентируют только 5 элементов: C, Mn, Si, P и S, концентрации которых близки к отечественным сталям. Вместе с тем, для обеспечения требуемых механических свойств на усмотрение изготовителя разрешают легирование металла Cr, Mo, V, Ni и Cu, проводить модифицирование и внепечную обработку. Немаловажно, что выплавку металла для стального литья в США осуществляют только в электродуговых печах, а в РФ ОСТ разрешал использовать для выплавки стали и мартеновские печи. Мартеновская печь не обеспечивала требуемые качественные показатели стали [51]. Особенно сложно было получить требуемое значение KCV^{-60}. Учеными установлено, что легирование углеродистых сталей ванадием и титаном было достаточно эффективно на образцах с U-образным надрезом при положительных температурах [36]. Однако при определении ударной вязкости на образцах с V-образным надрезом при –60 °С особой разницы между легированными и нелегированными сталями отмечено не было. Вначале KCV^{-60} в ОСТ ввели факультативом на уровне >167 кДж/см^2. Но даже такой низкий показатель литейщиками не достигался. Наблюдался большой разброс по значениям ударной вязкости KCV^{-60} [52]. Основной причиной являлась неудовлетворительная структура металла отливок, изготовленных из стали, выплавленной в мартеновской печи [51].

Большое влияние на свойства сталей при отрицательных температурах оказывала термическая обработка [57]. Так, после двойной нормализации KCV^{-60} существенно росло в результате уменьшения химической и структурной неоднородности в стали, однако это увеличивало трудоемкость изготовления отливок и удорожало сталь. Исследования [36, 44, 52, 53, 56]

выявили, что только в результате вариирования легирующими элементами при выплавке стали в сочетании с модифицированием и термической обработкой отливок возможно повысить уровень KCV^{-60} до 200 кДж/мм^2.

Учитывая вышесказанное, назрела необходимость, и ОАО «ВНИИЖТ» разработал новый ГОСТ 32400 [30] для литых рамы и балки, где определены марки стали, химический состав и механические свойства. Согласно его требованиям, σ_T стали для отливок должен достигать 343 МПа, $\sigma_B \geq 510$ МПа, $\delta \geq 18\%$, $\psi \geq 30\%$, $KCV^{-60} \geq 200$ кДж/м^2. Рамы и балки должны быть отлиты из стали, выплавляемой в агрегатах только с основной футеровкой. Сталь должна быть окончательно раскислена алюминием. Для достижения требуемых механических свойств ГОСТ допускает дополнительно использовать модифицирование, рафинирование и внепечную обработку. Жидкий металл может быть дополнительно очищен продувкой его инертным газом.

Новый ГОСТ32400 открыл широкие возможности для разработки и промышленного внедрения новых материалов и технологий для печной и внепечной обработки стали, направленных на повышение качества отливок. Следует использовать преимущества электродуговых печей, разработать и внедрить в производство технологии рафинирования стали для обеспечения требуемого уровня KCV^{-60}. Предпочтение следует отдавать технологиям с использованием дисперсных материалов.

1.1.2. Отливки из чугуна повышенной эксплуатационной стойкости для фрикционных узлов подвижного состава

Анализ современного состояния производства отливок из различных сплавов показывает, что чугун по-прежнему является одним из наиболее широко распространенных литейных конструкционных материалов. Поэтому он нашел свое применение в качестве материала для ответственной отливки «клин фрикционный» в тележке вагона. Одной из важнейших и актуальных задач является обеспечение необходимых эксплуатационных свойств этого узла, с целью повышения работоспособности гасителя колебаний и значительного увеличения межремонтного пробега грузовых вагонов. Исходя из этого, исследования, направленные на совершенствование тележки грузовых вагонов и ее компонентов, являются актуальными и вытекают из первоочередных задач, которые стоят перед железнодорожным транспортом страны.

Особый интерес у исследователей вызывает конструкция и материал отливки фрикционного клина, являющегося быстро изнашиваемой деталью. Как правило, средний пробег у фрикционных клиньев из серого чугуна до замены составляет чуть более 100 тысяч километров со средним износом (потерей массы) по вертикальной и наклонной стенкам в среднем от 15 до 20% от общей материалоемкости клина. Годовая потребность в этом виде расходных материалов, только при деповских ремонтах, составляет более полутора миллионов штук. При этом приблизительно четыре тысячи тонн чугуна безвозвратно теряется при истирании фрикционного клина.

В работе [62] доказана более успешная работа фрикционных клиньев, отлитых из чугуна, по сравнению со стальными. Исследователи работают над постоянным повышением их качества (постепенный переход с СЧ20 до СЧ35). И все же износостойкость клиньев из серого чугуна недостаточна для надежного обеспечения узлом гашения колебаний пробега грузовых вагонов не менее 250 тысяч километров. Очевидны преимущества высокопрочного чугуна в данном вопросе [58, 59, 60] Необходимо изготавливать фрикционные клинья из высокопрочного чугуна ВЧ120, что обеспечит пробег грузовых вагонов по узлу гашения колебаний не менее 500 тысяч километров. Микроструктура такого клина — бейнит и шаровидный графит [61, 62] Для этого требуется разработка технологии и внедрение термической обработки клиньев из высокопрочного чугуна [63, 64, 68, 70].

Исходя из этого, разработка новых технологий модифицирования чугуна для отливок фрикционных клиньев становится необходимой для обеспечения рациональной литой структуры чугуна за счет использования модифицирования и микролегирования [65–67]. Такие технологии должны позволять получение рациональной структуры литого металла без кардинального технического перевооружения литейных цехов при сохранении существующих технологий выплавки чугуна и формообразования отливок, обеспечивая весь комплекс требуемых механических и специальных свойств чугунов. Для этого необходимо разработать и внедрить в производство комплексный смесевой модификатор на основе дисперсных порошков, который способен решить вышеуказанные проблемы [18, 285].

1.1.3 Актуальность совершенствования технологии выплавки стали 110Г13Л методом переплава для производства ответственных отливок

Сталь 110Г13Л по-своему уникальна. Дав в свое время новый виток в развитии металлургической промышленности, сталь Гадфильда стала незаменимой для большой номенклатуры отливок, и поэтому не теряет своей актуальности и по сей день. 110Г13Л имеет свойства, которым практически нет аналогов и которые были так необходимы многим областям производства [72]. Вязкость аустенита, износостойкость и низкая твердость стали Гадфильда при высокой склонности к наклепу обусловили безальтернативное применение там, где материал должен выдерживать и поглощать высокие ударные нагрузки без быстрого выхода из строя, начиная с военной брони, танковых и тракторных гусениц, щек и конусов дробилок, зубьев и передних стенок ковша экскаватора, корпусов вихревой и шаровой мельниц, заканчивая тюремными решетками на окнах [72].

Незаменима сталь Гадфильда для производства ответственных железнодорожных отливок рельсовых крестовин и стрелочных переводов на железнодорожных путях по ГОСТ 7370. Кроме того, она отличается относительно высокой хладостойкостью, что позволяет отливкам из нее удовлетворительно работать при низких температурах до –0 °С. Это имеет важное значение в районах распространения вечной мерзлоты и в

Арктике [74]. Поэтому совершенствование технологии выплавки стали 110Г13Л как всегда актуально.

Для выплавки стали применяют способы окисления и переплава. Метод переплава значительно дешевле способа окисления, так как в шихте используют только лом Б22, а также собственный возврат. Кроме того, по расплавлению шихты образовавшийся шлак не удаляют, а сразу начинают его раскисление. В результате при выплавке стали методом переплава сокращается расход ферромарганца, предназначенного для легирования стали до 170 кг/т, электроэнергии до 15%. Повышается производительность плавильных агрегатов до 30%, так как сокращается время плавки до 60 минут [73, 74].

Вместе с тем у метода переплава есть существенный недостаток. При использовании этого способа выплавки стали очень трудно получить требуемое суммарное содержание MnO и FeO (<5%) [75] в предвыпускном шлаке, несмотря на повышение расхода раскислительных смесей, извести и плавикового шпата. В результате снижался уровень механических свойств стали и не обеспечивались требования ГОСТ по этим показателям. В связи с этим метод переплава на предприятиях применяют для изготовления не ответственных отливок. Для изготовления наиболее ответственного литья второй группы и особенно для производства крестовин железнодорожных, применяют плавку с окислением примесей [76].

Однако снижение себестоимости продукции и одновременное повышение механических и эксплуатационных свойств отливок из стали 110Г13Л выплавленных методом переплав становится актуальной задачей в связи с возрастающей конкуренцией за рынки сбыта продукции [1]. Зарубежные исследователи для решения этой проблемы предлагают дополнительно проводить легирование стали Ni, Mo, V [78–80, 84], а также модифицирование расплава [81–83, 85], однако это существенно удорожает литье.

Для существенного снижения себестоимости стали 110Г13Л и повышения эффективности производства в электропечах необходимо совершенствовать метод переплава стали. Следует использовать преимущества электродуговых печей, разработать и внедрить в производство технологии комплексного рафинирования стали 110Г13Л новыми дисперсными материалами начиная с периода плавления и заканчивая внепечной обработкой расплава для обеспечения требуемого уровня механических свойств.

Подводя итог вышесказанному, можно сделать вывод, что для производства отливок ответственного назначения из низколегированных и легированных сталей требуется получение высоких механических свойств и особенно ударной вязкости с острым надрезом при отрицательных температурах, а для этого необходимо получать расплавы с низкими содержаниями P и S≤0,02%. а этого невозможно добиться без выплавки и внепечной обработки стали в надежных плавильных агрегатах. Поэтому в

дальнейшем необходимо рассмотреть современные достижения в области плавки, внепечной обработки, рафинирования и модифицирования сталей для отливок ответственного назначения.

1.2. Современные достижения в области плавки, внепечной обработки, рафинирования и модифицирования сталей для отливок ответственного назначения

1.2.1. Плавка стали в электродуговых печах

Электродуговые печи имеют неоспоримые металлургические преимущества по сравнению с индукционными и другими агрегатами, а также большую на 23–30% производительность при одинаковой емкости печей, что делает применение электродуговых печей оправданным и даже необходимым [97].

Так, плавка стали в индукционных печах имеет ряд существенных недостатков. Одним из них является высокая стоимость оборудования, потребность в большом количестве электроэнергии и высокая стоимость передела, так как на 1 т стали при твердой завалке расходуют 600–950 кВт·ч электроэнергии [87].

Самый главный недостаток плавки в индукционных печах — это холодные, вязкие, нереакционноспособные шлаки, не позволяющие рафинировать стали для отливок ответственного назначения и получать металл с низким содержанием серы (<0,02%) и кислорода (<0,005%). Качество металла, выплавляемого в индукционных печах, в значительной мере определяется качеством шихты. По существу, плавка в таких печах есть переплав чистой, специально отобранной металлической шихты с добавкой ферросплавов, лигатуры и некоторого количества шлакообразующих добавок [88, 89]. Наибольшее распространение индукционные печи получили в цехах при производстве мелкого фасонного стального литья общего назначения, во многом благодаря постоянным инновациям в области индукционной плавки [90].

В настоящее время мартеновский способ производства стали практически вытеснен гораздо более эффективной электроплавкой. Специалисты ВНИИЖТ считают, что металл, выплавленный в мартеновской печи [91] не обеспечивает оптимальной структуры и механических свойств отливок боковых рам и балок. И только флагман отечественного машиностроения «Уралвагонзавод», единственный на сегодняшний день в РФ, использует три 60-тонные мартеновские печи с основной футеровкой для производства ответственного железнодорожного литья «рама боковая» и «балка надрессорная» [92, 93]. Ученые проводили большую работу по повышению качества мартеновской стали, но ощутимых результатов получить не удалось [94–96]. Разрабатываемые мероприятия позволяют получить $KCV^{-60} \geq 200 кДж/м^2$, но они резко удорожают сталь. Поэтому необходимо плавить сталь в дуговых электропечах. Архиважно, что технология плавки в

ДСП способна обеспечить требования ГОСТов 32400, 7370, 33260 и 21357 к отливкам ответственного назначения по низким концентрациям вредных примесей в сталях S и P≤0,02%, по уровню требуемых служебных свойств, а также высокие технико-экономические и экологические показатели.

Для плавки стали применяют электродуговые сталеплавильные печи постоянного и переменного тока. По емкости печи подразделяются на печи малой емкости (до 20 т), средней (от 21 до 75 т) и большой (более 75 т). Печи загружают сверху, при этом свод приподнимают и поворачивают в сторону или печь выезжает из-под него. Для слива шлака печь наклоняют в сторону рабочего окна, для выпуска металла — в сторону выпускного отверстия. В зависимости от удельной мощности источника тока дуговые печи подразделяются на маломощные (менее 400 кВ·А/т), средней мощности (400–600 кВ·А/т), высокомощные (600–800 кВ·А/т) и сверхмощные (более 800 кВ·А/т). В зависимости от вида огнеупоров, используемых для футеровки печи, бывают основные и кислые.

В течение последних двух десятилетий в большой металлургии ДСП все чаще используют лишь для расплавления шихты и выплавки полупродукта; все рафинировочные операции, легирование, доводку металла по составу и температуре осуществляют в агрегаты комплексной обработки сталей (АКОС) [98, 99]. Это позволило достичь весьма высоких показателей как в показателях качества стали, так и в части энерго- и ресурсосбережения в технологической системе ее выплавки и разливки [100, 101]. АКОС начали успешно использовать и в литейном производстве на вновь открывающихся современных предприятиях. Ярким представителем такого предприятия является сталелитейный завод ООО «БВК» (г. Челябинск), обладающий уникальными технологиями, позволяющими выпускать ответственные отливки из низколегированных сталей [102].

Следует отметить, что в настоящее время в сталеварении ведется так называемое соревнование дуговых печей постоянного (ДППТ) и переменного тока (ДСП) [103]. Каждый тип печей имеет свои преимущества и недостатки. Производители стали выбирают тип печи исходя из условий их эксплуатации, наличия или отсутствия мощных электропитающих сетей, обеспеченности металлошихтой различного вида и качества, обеспеченности топливом, кислородом, возможности рафинирования жидкого металла в агрегатах внепечной обработки, экологических требований и других факторов [103, 105].

Но на сегодняшний день нет однозначного ответа, какой тип печей позволяет выплавлять более качественные стали. **Поэтому актуальными становятся исследования по сравнению качественных показателей сталей, выплавленных в печах переменного и постоянного тока.**

Общеизвестно, что большое значение во всех технологических процессах плавки в электродуговых печах играют шлаки, поэтому необходимо рассмотреть их роль в получении качественной стали.

1.3. Роль шлаков в выплавке стали

Шлаки являются не только неизбежным продуктом металлургического производства, но и являются второй после металлов фазой по массе, энерго- и материалоемкости. Они играют существенную роль в процессах получения стали. По существу, шлак является таким же, как металл, равноправным участником любого металлургического процесса. Формирование шлака нужного состава и с необходимыми свойствами является такой же важнейшей задачей для металлургов, как и получение чугуна и стали [106–108].

Химический состав шлаков является их важнейшей характеристикой, так как он определяет основные физико-химические свойства шлаков. Любой сталеплавильный шлак обычно представляет собой сложный расплав, состоящий из десятков оксидов различных металлов и металлоидов [109, 110]. Эти оксиды образуют между собой еще большее число различных двойных, тройных и даже более сложных соединений (солей) [111–116]. Однако основные физико-химические свойства шлаков определяются содержанием в них ограниченного количества оксидов и их соединений между собой. Оксидами, обычно оказывающими решающее влияние на свойства шлака, являются CaO, FeO, MnO, MgO *(*основные*)*, SiO_2, P_2O_5 *(*кислотные*)*, $A1_2O_3$, Fe_2O_3 *(*амфотерные*)*. При переделе легированной шихты в шлаках также могут содержаться в значительных количествах оксиды Cr_2O_3 и V_2O_3 *(*амфотерные*)*, TiO_2 и WO_3 *(*кислотные*)*. В некоторых случаях может иметь практическое значение содержание в шлаках оксидов щелочных металлов Na_2O и K_2O [117].

В настоящее время в металлургии преобладает тенденция использования главным образом сталеплавильных агрегатов с основной футеровкой.

Химические свойства шлаков во многом определяются соотношением концентраций основных и кислотных оксидов, количественной характеристикой которого является основность шлака [118].

Универсальной формулой для определения основности шлака (B) является отношение суммы концентраций основных оксидов к сумме концентраций кислотных и амфотерных оксидов [118]:

$$B = \frac{(CaO) + k_1(FeO) + k_2(MnO) + k_3(MgO) + \ldots}{(SiO_2) + k'(P_2O_5) + k''(Al_2O_3) + k'''(Fe_2O_3) + \ldots}, \qquad (1.1)$$

где k_1, k_2, k_3 — коэффициенты, величиной которых учитывается эквивалентность FeO, MnO, MgO наиболее сильному основному оксиду CaO; k^1, k^{11}, k^{111} — коэффициенты, величиной которых учитывается эквивалентность P_2O_5, Al_2O_3, Fe_2O_3 наиболее сильному кислотному оксиду SiO_2.

На сегодняшний день точные значения коэффициентов эквивалентности различных оксидов не полностью установлены [106]. Поэтому практическое

использование формулы (3.1) не представляется возможным. Обычно для расчета основности шлака пользуются упрощенным соотношением:

$$B = \frac{(CaO)}{(SiO_2)+(P_2O_5)}, \quad (1.2)$$

а при переработке низкофосфористых материалов основность шлака можно определять при помощи уравнения:

$$B = \frac{(CaO)}{(SiO_2)}. \quad (1.3)$$

Рассчитанная при помощи соотношений (1.2) и (1.3) величина основности шлака является достаточно точной его характеристикой при высоких температурах заключительного периода плавки. Однако она не учитывает того, что при низких температурах начала плавки FeO обладает свойствами основного оксида. По этой причине образующиеся в начальном периоде плавки шлаки с высоким содержанием оксидов железа могут удалять из металла значительные количества серы и фосфора, имея основность B<1. При высоких температурах конца плавки для успешного удаления серы и фосфора из металла основность шлака должна составлять не менее 2,5–3,0. **Поэтому в условиях сталеплавильных процессов главная роль в образовании основных шлаков принадлежит извести CaO** [111, 119].

Температура плавления оксида кальция превышает 2800 °С. Такие высокие температуры наблюдают только в локальных объемах ванн сталеплавильных агрегатов, например, вблизи зоны горения электрической дуги или в первичной реакционной зоне при продувке ванны кислородом. По этой причине основное количество извести растворяется в сталеплавильном шлаке из твердого состояния [119]. Анализ литературных данных и опыт работы действующих цехов показывает, что основные технологические показатели плавки существенным образом зависят от скорости формирования и свойств шлака на всех этапах и особенно в начальный ее период [119, 120, 121]. Шлакообразование является наиболее медленным процессом плавки и во многом определяет величину потерь теплоты и металла, ход рафинирования, а также стойкость футеровки.

Принято считать, что в условиях сталеплавильных процессов главная роль в растворении извести принадлежит оксидам железа или обладающим сходными с ними свойствами оксидам марганца [122–123]. Это мнение основано на следующем:

- в шлаках традиционных сталеплавильных процессов, основанных на окислительном рафинировании, оксиды железа всегда присутствуют в значительных количествах;

- с увеличением содержания (FeO) существенно улучшаются условия смачивания извести шлаком, что облегчает проникновение шлака по трещинам и порам внутрь кусков извести;
- оксиды железа и кальция имеют сходные кристаллические решетки. Ионы, из которых состоят оксиды железа (Fe^{2+}, Fe^{3+} и O^{2-}), имеют малые размеры, что облегчает проникновение оксидов железа в кристаллическую решетку извести и их диффузию вглубь кусков;
- в результате взаимодействия оксидов кальция и железа образуется большое количество легкоплавких твердых растворов и ферритов кальция.

Ускорение формирования основного шлака способствует снижению потерь металла от окисления, улучшению процессов дефосфорации и десульфурации и снижению негативного воздействия кислых оксидов на футеровку агрегата.

Для интенсификации шлакообразования необходимо разработать разжижитель шлака, который будет загружаться на подину печи сверху извести и способствовать раннему наведению шлака. Его необходимо изготавливать на основе дисперсных карбонатов кальция. В результате диссоциации карбонатов и выделения CO_2 будет устраняться главный фактор, влияющий на замедление процесса растворения извести в шлаке в начальный период плавки, которым является реакция взаимодействия SiO_2 и CaO с образованием тугоплавкой пленки $2CaO{\cdot}SiO$ [122]. CO_2, выделяющийся в результате реакции диссоциации карбоната, препятствует образованию пленки и способствует ускорению процесса растворения извести в шлаке. Образовавшийся в результате диссоциации дисперсный, высоко пористый CaO усваивается шлаком полнее и в 1,5–2,0 раза быстрее [122]. Высокая скорость растворения активной извести способствует также раннему и более полному удалению серы и фосфора из металла. Рациональна добавка в смесь флюсов, понижающих вязкость шлака, резко снижающих температуру плавления шлаков и способствующих растворению извести. В этом отношении наиболее эффективной является присадка плавикового шпата CaF_2. По данным некоторых исследований, ввод в шлак MgO в количестве 4–6%, например, в виде доломитизированной извести, также способствует понижению вязкости шлака и улучшению шлакообразования [124, 125]. В основных шлаках Al_2O_3 в количестве до 10–12% ускоряет растворение извести и понижает вязкость шлака. При более высоких концентрациях глинозема технологические свойства шлака могут ухудшаться. В некоторых случаях может иметь практическое значение добавки оксидов щелочных металлов Na_2O и K_2O. **Таким образом, разработка дисперсных смесей на основе кальций-стронциевого карбоната, способствующих раннему наведению шлака, является актуальной задачей.**

1.3.1. Преимущества вспенивания шлака во время выплавки стали

Давно известное сталеплавильщикам отрицательное явление вспенивания шлака, затрудняющее теплопередачу в мартеновских печах и создающее опасность выбросов металла в кислородных конвертерах, в электродуговых печах оказалось важнейшим положительным технологическим приемом. В настоящее время роль вспененного шлака в обеспечении повышения эффективности процесса выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах ни у кого не вызывает сомнения.

Первым шагом решения проблемы увеличения подводимой мощности в дуговых печах было использование интенсивного охлаждения стен и свода печи. Однако даже водяное охлаждение не в состоянии было обеспечивать стойкость футеровки против огромных тепловых нагрузок. При свободном горении дуги общая степень передачи энергии составляет только 35% [126]. Если исходить из того, что общее количество остальной излучаемой дугой энергии распределяется равномерно между стенкой и сводом печи, ванной расплава, то по мере увеличения степени экранирования электрической дуги вспененным шлаком коэффициент использования тепла электрических дуг возрастает с 0,39 практически до 0,98 (табл. 1.8).

Таблица 1.8

Тепловой режим ДСП в зависимости от степени экранирования дуг при вспенивании шлака

Параметры	Экранирование шлаком при вспенивании электрической дуги, %					
	0	20	40	60	80	100
Длина неэкранированной шлаком части дуги, мм	435	355	205	79	15	0
Угловой коэффициент излучения дуг на зеркало расплава.	0,37	0,47	0,57	0,67	0,79	1
Коэффициент использования тепла электрических дуг	0,39	0,49	0,59	0,69	0,79	0,98

Таким образом, наибольший коэффициент использования тепла электрических дуг прослеживается при полном экранировании электрических дуг вспененным шлаком [126, 127]. А также экранирование электрических дуг шлаком и увеличение вводимой мощности приведет к уменьшению длительности электроплавки и сокращению удельного расхода электроэнергии на тонну выплавляемой стали, что говорит о перспективности вспенивания шлака на ДСП. Кроме того, когда дуги погружены в шлак, они горят стабильнее и тише, так как уменьшаются колебания силы тока и напряжения, что позволяет повысить подводимую мощность трансформатора примерно на 15% и, следовательно, сократить токовое время, общую продолжительность плавки и уменьшить удельный расход электроэнергии,

вплоть до уровня около 120 кВт·ч/т жидкой стали или около 0,686 кВт·ч/град, что позволяет увеличить подводимую мощность и длину дуг [126, 127]. При увеличении длины дуг ток уменьшается. В результате этого, а также меньшего бокового расхода при экранировании дуг шлаком снижается расход электродов [126, 128].

Основным фактором, влияющим на образование вспененного шлака, являются газовая фаза CO, образующаяся в результате реакций восстановления FeO шлака углеродом, и диссоциация карбонатов [129, 130]. Так, например, дополнительная экономия электроэнергии наблюдается при присадке на шлак необожженного доломита, хотя на его разложение расходуется энергия, но выделяющийся при диссоциации CO_2 дополнительно вспенивает шлак [131].

Работы А. А. Кожухова доказали, что любой сталеплавильный шлак можно вспенить, только для этого необходимо обеспечить достаточный объем образующегося вспенивающего газа (CO) [133, 126, 129].

Отсюда идеальным условием для поддержания шлаков во вспененном шлаке является подача на шлак УСМ и дисперсных карбонатов, за счет чего можно достичь более эффективного ведения плавки стали, и уменьшения расхода электроэнергии [131, 132].

При производстве отливок ответственного назначения необходимо использовать преимущества вспененных шлаков. А для этого необходимо создавать новые рафинирующие присадки, способные для повышения их эффективности вспенивать шлак. В этом случае как нельзя лучше подходит добавка в создаваемые смеси рационального количества УСМ и кальций-стронциевого карбоната, присутствие которых гарантированно обеспечит вспенивание шлака.

1.3.2. Двухшлаковая технология электроплавки

Основным преимуществом, которым обладает электропечь по сравнению с другими плавильными агрегатами широко распространенная двухшлаковая технология электроплавки. Технология позволяет рафинировать ответственные марки главным образом легированной стали под хорошо раскисленными основными шлаками и получать металл с низким содержанием серы, фосфора (<0,02%) и кислорода (<0,005%). Это очень важно для производства фасонного литья, где не всегда целесообразно использовать агрегаты комплексной обработки сталей (АКОС). При малой металлоемкости форм наиболее рациональная емкость электропечей 3–6 тонн и здесь наиболее приемлема двухшлаковая технология выплавки стали.

Плавки стали в печах с основной футеровкой необходимо проводить с окислением. Во время окислительного создаются благоприятные условия для удаления фосфора. Сразу же по расплавлению металла и шлака печь наклоняют в сторону рабочего окна и скачивают первый шлак. Если этого оказывается недостаточно для снижения фосфора в стали до требуемой величины, наводят новый высокоосновный шлак и проводят рудный кип,

после чего шлак повторно удаляют. Эту операцию можно повторять до получения заданного содержания фосфора.

В данном случае при расплавлении шихты целесообразно применить ранее наведение первого основного шлака с помощью разработанных специальных присадок, что будет способствовать снижению потерь металла от окисления, повышению эффективности процесса дефосфорации, снижению времени расплавления шихты, экономии электроэнергии и снижению негативного воздействия кислых оксидов на футеровку агрегата.

Чтобы добиться высокого качества выплавляемой стали в ДСП, проводят так называемый восстановительный период — диффузионное раскисление стали. **При выплавке сталей для ответственного фасонного литья он является наиболее ответственным за качество стали. Диффузионное раскисление** позволяет повысить эффективность следующего за ним модифицирования стали, так как качественное проведение диффузионного раскисления способствует максимальному удалению кислорода и глубокой десульфурации [137, 138]. Операции внепечной обработки плохо раскисленного металла с повышенным содержанием серы вызывают перерасход модификатора [139, 140]. В данном случае активные элементы модификатора вначале будут взаимодействовать с кислородом и серой расплава. Они сохранятся не полностью для модифицирования неметаллических включений и формирования необходимой структуры металлической матрицы.

Кроме того, в это время восстанавливаются также оксиды марганца, хрома и других легирующих элементов. Основным преимуществом «классического» метода диффузионного раскисления является обеспечение минимума неметаллических включений в объеме металлической ванны. Однако нельзя забывать, что при раскислении (FeO) шлака обычно применяемыми для этой цели алюминием, кремнием и углеродом или несколькими из них в различной комбинации неизбежно происходит восстановление фосфора из шлака в металл. Поэтому предварительно шлак должен быть удален из печи в возможно полной степени и заменен новым. Наведение нового шлака сама по себе также способствует раскислению металла.

Отличительной особенностью диффузионного раскисления является участие шлаковой фазы в металлургических процессах восстановления оксидов. Первоочередная задача заключается в связывании серы и восстановлении оксидов железа в шлаке. Диффузионное раскисление основано на принципах закона распределения Нернста [141], согласно которому соотношение концентраций вещества, растворенного в двух смежных несмешивающихся жидкостях, для данных температур и давлений является постоянной величиной:

$$L=[FeO] / (FeO)=const; \quad (1.4)$$

$$L=[FeS] / (FeS)=const, \quad (1.5)$$

где [FeO], [FeS], — концентрации оксидов и сульфидов железа в стали;
(FeO), (FeS) концентрации оксидов и сульфидов железа в шлаке.

Если уменьшить концентрации оксидов в шлаке, начнется диффузионный переход кислорода и серы из металла в шлак, то есть рафинирование металла.

При уменьшении концентрации оксида железа в шлаке можно достичь довольно низкой равновесной концентрации растворенного в стали кислорода. К недостаткам диффузионного раскисления следует отнести длительность восстановительного периода, которая может достигать 45–60 мин. и связана с процессом диффузии, а также с ограниченной поверхностью раздела фаз [142]. Для диффузионного раскисления сталей применяют обычно раскислительные смеси, которые состоят чаще всего из дробленых коксика, феросилиция ФС75, гранулированного алюминия. Готовят смеси сами сталевары. Такой способ приготовления и фракционный состав смеси не позволяет обеспечить равномерное распределение материалов в составе при перемешивании и, как следствие, во время рафинирования шлака компоненты реагируют неодновременно и неравномерно по всему объему шлака. Операцию раскисления приходится неоднократно повторять подачей очередных порций смесей до получения белого рассыпчатого шлака, что увеличивает расход материала и время восстановительного периода. Таким образом, отмечается большая трудоемкость подготовки раскислительных смесей и создающиеся при этом неблагоприятные экологические условия труда на участках подготовки шихты и плавки.

Поэтому представляется актуальным создание новой технологии, позволяющей резко снизить время восстановительного периода при одновременном повышении эффективности раскисления. **Для максимального повышения эффективности рафинирования расплава актуально также восстановительный период проводить под вспененным шлаком. Для этого необходимо создавать новые раскислительные смеси, которые наряду с высокой реакционной способностью способствовали бы и вспениванию шлака.**

1.3.4. Одношлаковый процесс

Одношлаковый процесс электроплавки, связанный с переплавом лома, видимо, сохранит свои позиции на длительный срок, что связано с экономической целесообразностью переработки всего образующегося лома. Эту разновидность плавки используют при выплавке высоколегированных (износостойких, коррозионностойких, быстрорежущих и др.) сталей методом переплава легированных отходов. Для этой цели целесообразно использовать дуговые печи с относительно небольшой емкости, что характерно для литейного производства. Выплавка сталей одношлаковым методом в дуговых печах связана с раскислением, доводкой металла до нужного состава и

температуры под шлаком, образующимся во время плавления. Поскольку скачивание шлака не проводится, необходимо повышать результативность диффузионного раскисления. Это можно обеспечить разработкой новых диффузионных раскислителей. Это особенно важно для износостойкой стали 110Г13Л, большое количество которой производится методом переплава. Основными потребителями отливок из высокомарганцовистой стали в РФ и за рубежом являются РЖД, горно-обогатительные, машиностроительные и другие промышленные предприятия [143–145].

В производстве отливок ответственного назначения из высокомарганцовистой стали в электродуговой печи методом переплава очень важно раннее шлакообразование, то есть получение в короткий срок гомогенного шлакового расплава. Шлакообразование является наиболее медленным процессом плавки и во многом определяет величину потерь теплоты и металла, ход рафинирования. Ускорение формирования основного, способствует снижению потерь металла от угара, улучшению процессов дефосфорации и десульфурации.

В условиях сталеплавильных процессов главная роль в образовании основных шлаков принадлежит извести. Температура плавления оксида кальция превышает 2800 °С. Это существенно выше температуры расплава стали и шлаков. Такие высокие температуры наблюдаются только в локальных объемах ванн сталеплавильных агрегатов, например, вблизи зоны горения электрической дуги. По этой причине основное количество извести растворяется в сталеплавильном шлаке из твердого состояния после расплавления шихты и первичного шлака [111].

Механизм растворения извести в образующемся шлаке включает следующие основные звенья:

1. На поверхности куска извести образуется пленка насыщенного CaO раствора с концентрацией (Са), которая выше концентрации CaO в объеме жидкости (С). Образование пленки сопровождается образованием твердых и жидких растворов, а также химических соединений системы CaO-FeO-MnO-SiO_2. Скорость дальнейшего растворения определяется скоростью массопереноса через эту пленку. Выраженная через изменение массы CaO (G) в единицу времени τ, эта скорость может быть описана уравнением:

$$dG/d\tau = -kF\left(C_{\text{н}} - C\right) = -\left(D/\delta\right)F\left(C_{\text{н}} - C\right), \tag{1.6}$$

$$\frac{dF}{d\tau} = -kF(C_{\text{н}} - \text{C}) = -\left(\frac{D}{\delta}\right)F(C_{\text{н}} - \text{C}) \tag{1.7}$$

где k — константа скорости;
F — поверхность куска извести;
D — коэффициент диффузии в пленке.

2. Проникновение жидкого шлака по порам и границам зерен с развитием упомянутых процессов на поверхности.

3. Оплавление и переход в шлак поверхностных (пленочных) слоев.

Как показали экспериментальные исследования, скорость ассимиляции (растворения) извести шлаком лимитируется скоростью массопереноса CaO через образующуюся на куске пленку. Как видно из уравнения (1.6, 1.7), скорость массопереноса увеличивается с увеличением константы скорости k, которая равна отношению коэффициента диффузии (D) к толщине пленки (δ), а также с увеличением поверхности контакта куска извести со шлаковым расплавом. Толщину пленки необходимо уменьшать, что, соответственно, увеличит константу скорости растворения. Для этого необходимо уменьшить температуру плавления пленки, которое вызовет смыв пленки.

Скорость ассимиляции извести повысится также с увеличением поверхности твердой фазы (F). Такому увеличению будет способствовать уменьшение размера кусков извести и препятствие спеканию извести, в свою очередь, этому будет способствовать проникновение жидкого шлака по порам и границам зерен извести.

Результаты петрографических исследований механизма шлакообразования показали, что процесс растворения извести на плавках проходит стадии образования и превращения первичной структурной фазы шлакового расплава, которая в твердом состоянии образует железисто-марганцовистый монтичеллит CaO(Mn, Mg, Fe)·O^SiO_2 с температурой плавления 1208 °C [111]. Монтичеллит представляет собой единственную кристаллическую фазу первичного шлака и составляет 88–91%, остальное приходится на долю SiO_2 [111, 112]. По мере расплавления металла с увеличением концентрации катионов Fe^{2+} и Mn^{2+} в расплаве повышается скорость растворения извести в шлаке. Ионы, из которых состоят окислы железа (Fe^{2+}, Fe^{3+}, O^{2-}) имеют небольшие размеры: rFe^{2+}=0,83A, rFe^{3+}=0,67A, rO^{2-}=1,32A и кристаллизуются так же, как и CaO, в кубической системе. Близкие к ним размеры имеют оксиды марганца. Это облегчает диффузию оксидов железа и марганца в решетку извести с образованием легкоплавких и маловязких растворов FeO-MnO-CaO так называемая RO-фаза [111, 112] и улучшением условий проникновения шлака в куски извести вследствие лучшего смачивания.

Проникновение окислов SiO_2 затруднено большими размерами образующихся при этом ионов SiO_4a^{4-} (r=2,79A) [113].

Для более полного и быстрого растворения извести необходимо разработка и внедрения ряда мероприятий. Особого внимания из них заслуживает подача на подину печи совместно с известью флюсов, понижающих вязкость шлака и способствующих растворению извести. Ускорить шлакообразование можно введением в ванну добавочных материалов, снижающих температуру плавления шлакообразующих материалов и повышающих жидкоподвижность шлака. На практике для этого в основной шлак добавляют боксит с высоким содержанием Al_2O_3 и плавиковый шпат с высоким содержанием CaF_2. В этом отношении наиболее эффективной является присадка плавикового шпата CaF_2, который не только

уменьшает вязкость шлака, но и резко снижает температуру плавления растворов системы $CaO\text{-}CaF_2$.

Ранее наведение шлака целесообразно внедрять при выплавке сталей для производства отливок ответственного назначения. Для этого необходимо разработать новый эффективный флюс, который будет использоваться для раннего наведения шлака. При этом необходимо учесть вышеизложенный накопленный исследователями опыт.

Следует подчеркнуть, что и в кислых печах используют одношлаковый процесс, потому что в печах с кислой футеровкой невозможно удалять серу и фосфор. Следовательно, необходимо рассмотреть особенности кислой плавки и наметить пути ее совершенствования.

1.4. Актуальность совершенствования технологического процесса выплавки стали в печах с кислой футеровкой

Кислая печь получила широкое распространение в РФ для выплавки среднеуглеродистых сталей для отливок [87]. Преимущества ее перечислены ниже [88–89].

В отношении тепловой работы печи кислая футеровка предпочтительнее. По сравнению с основными кислые шлаки обладают более высоким сопротивлением, что позволяет нагревать жидкую сталь более короткой дугой на высокой ступени напряжения печного трансформатора. Это улучшает передачу тепла металлу и увеличивает электрический КПД установки. Доля жидкого периода плавки (суммарная продолжительность окислительного и восстановительного периодов) в кислых печах намного меньше, чем в основных, так как при проведении кислой плавки не выполняют рафинирование от фосфора и серы и вводят меньшее количество легирующих присадок. Большой удельный вес по времени периода плавления позволяет полнее использовать мощность трансформатора, ввиду чего кислые печи целесообразно оборудовать трансформаторами более высокой удельной мощности, чем в случае основных печей. Это позволяет быстрее расплавлять металл и сокращает длительность плавки в целом.

В связи с отсутствием условий для дефосфорации и десульфурации металла геометрия ванны кислых печей отличаются от геометрии ванны основных печей. Для дуговых печей с кислой футеровкой удельная поверхность зеркала металла не имеет особого значения, поэтому форму ванны целесообразно выбирать исходя из минимума тепловых потерь, что достигается при более глубокой ванне. Уменьшению тепловых потерь через кладку и более быстрому нагреву металла способствует также более низкая теплопроводность кислых огнеупоров. Из-за отсутствия длительных периодов рафинирования металла от фосфора и серы это обеспечивает более высокий тепловой КПД дуговой печи, значительное сокращение длительности плавки, уменьшение расхода электроэнергии и электродов.

Меньшая продолжительность плавки и более высокая термостойкость кислых огнеупоров обусловливают более высокую стойкость футеровки в кислых печах: она в несколько раз выше, чем у основной печи. И так как стоимость песка и динасового кирпича намного меньше стоимости магнезитовых огнеупоров, то удельные затраты на футеровку кислых печей в 2,5–3,0 раза ниже, чем основных.

Высокая термостойкость кислой футеровки допускает, кроме того, периодический характер работы с многократными разогревами и охлаждениями печи. Основные огнеупоры при таких условиях растрескиваются, а пропитанные известковым шлаком слои основной футеровки при охлаждении рассыпаются в порошок.

Из сопоставления преимуществ и недостатков кислых дуговых печей следует, что кислые дуговые печи лучше основных приспособлены для плавления и нагрева металла и значительно уступают им по возможностям получения качественной стали для ответственных отливок из обычной шихты в связи с невозможностью удаления серы и фосфора в процессе плавки. Высокое содержание в шлаке окиси кремния исключает возможность перехода из металла в шлак фосфора и серы, поэтому в печах с кислой футеровкой отсутствуют условия для проведения важнейших металлургических процессов — дефосфорации и десульфурации стали.

В шихту кислых печей, кроме оборотного скрапа, необходимо вводить специально выплавляемую в основных печах шихтовую заготовку или лом с низким содержанием фосфора и серы. Дефицит и высокая стоимость таких шихтовых материалов ограничивают использование печей с кислой футеровкой. Поэтому в восстановительный период плавки проводят только глубинное раскисление стали [89].

По расплавлении шихты ванна покрывается железистым шлаком, имеющим по остывании черный излом. Шлак состоит из оксидов, образующихся при окислении железа, марганца и кремния шихты, из кремнеземистых материалов подины и откосов, из окалины и ржавчины шихты. Металл этого периода, если выплавляется, например, углеродистая сталь марки 25, при расчетном составе шихты 0,37% C, 0,6% Mn, 0,26% Si имеет состав 0,30–0,40% C, 0,20–0,25% Mn, 0,06–0,15% Si, а шлак содержит 40–50% $Si0_2$, 6–7% CaO, 14–18% MnO, 30–40% FeO, 2–5% $A1_2O_3$. Температура металла по расплавлении составляет 1570–1580 °C. Как видно, шлаки периода плавления содержат до 40% оксидов железа. Если металл под таким шлаком нагреть до высокой температуры, то ванна закипает без присадки железной руды. Скорость выгорания углерода при этом равна 0,2–0,3%/час, и за 30 мин. содержание углерода понизится на 0,10—0,15%. Для увеличения скорости выгорания углерода окисление чаще всего ведут с помощью железной руды или газообразного кислорода. В этом случае скорость обезуглероживания достигает 0,4–0,6% °C/час. Железную руду для окисления примесей металла дают небольшими порциями, добиваясь равномерного кипения. При средней скорости выгорания углерода 0,3–0,4%/час продолжительность окисления

длится около 30 мин, при этом выгорает 0,15–0,20% С. К концу окислительного периода металл имеет состав: 0,15–0,20% С, 0,10–0,15% Mn, 0,03–0,05% Si. Состав шлака: 50–55% SiO_2, 10–15% MnO, 20–25% FeO, 7–8% CaO, 2–3% $A1_2O_3$. Температура металла 1600–620 °С [220]. **При содержании в шлаке силиката кремнезема до 50% температура плавления шлака приближается к 1400 °С. Такой шлак очень вязок и неактивен. Кроме того, кислый шлак содержит значительно большее содержание MnO и FeO, чем основной** [89].

После окислительного периода сразу же приступают к раскислению металла. Иногда в литейных цехах проводят так называемый кремневосстановительный процесс [87, 88, 89, 220]. Шлак и металл окислительного периода нагревают. В густом шлаке диффузия закиси железа к поверхности металла замедляется, вследствие чего кремний, восстанавливающийся по реакциям (1.8–1.10) из футеровки и шлака, накапливается в металле и восстанавливает находящиеся в нем оксиды:

$$(SiO_2) + 2\,[C]=[Si] + 2CO\uparrow, \qquad (1.8)$$

$$(SiO_2) + 2\,[Fe]=[Si] + 2\,(FeO), \qquad (1.9)$$

$$(SiO_2) + 2\,[Mn] — [Si] + 2\,(MnO). \qquad (1.10)$$

При низкой концентрацией углерода и марганца в ванне и при высокой температуре металла восстановление кремнезема производится железом. Так как продуктом реакции является оксид железа, то степень раскисления металла при этом ниже, чем при реакции восстановления кремния углеродом. Понятно также, что рассчитывать на удаление газов при восстановлении кремнезема железом, когда отсутствует кипение, не приходится — металл получится пониженного качества. Поэтому в литейных цехах металл в кислой дуговой печи чаще всего раскисляют присадками ферросилиция. Окончательное раскисление марганцем и алюминием в печи проводят за 2–3 мин. до выпуска или в ковше. При кислом процессе, где сера не удаляется из стали, конечное раскисление преследует дополнительную цель — обезвредить, насколько возможно, влияние серы. Количество алюминия для раскисления выбирают таким, чтобы не только предотвратить развитие процесса окисления углерода при охлаждении и кристаллизации металла, но и ослабить вредное влияние повышенного в кислой стали содержания серы. Однако металл все равно имеет пониженные механические свойства. Учитывая вышесказанное, для получения высококачественного литья с пониженным содержанием серы и фосфора и высокими механическими свойствами, а также при наличии шихты, загрязненной серой и фосфором, предпочтение отдают печам с основной футеровкой.

Для существенного повышения качества литья и механических свойств стали, выплавляемой в электропечах с кислой футеровкой,

следует ввести в технологический процесс плавки восстановительный период с применением специальных дисперсных раскислительных смесей, разжижающих и вспенивающих шлак, повышающих его активность. Это позволит проводить эффективное диффузионное раскисление стали и максимально удалить из металла оксиды железа и марганца и других металлов. Заканчивать плавку необходимо внепечной обработкой расплава дисперсными рафинирующими присадками для дальнейшей очистки металла от оксидных включений. В конечном итоге это позволит существенно повысить механические свойства кислой стали.

1.5. Применение модифицирования для повышения эксплуатационной надежности отливок ответственного назначения

Универсальным, относительно дешевым, технологически гибким и высокоэффективным методом управления структурой кристаллизующегося расплава является модифицирование, которое служит для повышения качества ответственных литых заготовок. При производстве фасонного литья технологии модифицирования ранее недооценивали. В настоящее время эти направления активно развиваются [146]. После модифицирования существенно уменьшается загрязненность стали НВ, что приводит к повышению КС как при обычных, так и при низких температурах [147]. Согласно классификации Симса — Даля различают три вида неметаллических включений: 1) глобулярные, 2) пленочные по границам зерен, 3) остроугольные [256]. Наиболее опасны включения второго типа — пленочные по границам зерен. Предпочтение следует отдавать глобулярным включениям первого типа. Остроугольные включения третьего типа опаснее глобулярных. Поэтому важной задачей сталеварения является управление природой включений с целью получения необходимого комплекса механических свойств и повышения конструкционной прочности материалов. Это достигается применением модификаторов с высоким рафинирующим эффектом и способностью осуществлять глобуляризацию неметаллических включений [257]. Модифицирование расплава производят, присадками в него лигатур? содержащих элементы, которые позволяют резко улучшить качественные показатели материала отливок, повысить жидкотекучесть стали, снизить температуру заливки расплава [78, 148]. Изменение химического состава и физических параметров обеспечивают обработанному модифицирующими присадками расплаву увеличение не только механических свойств стали, но и высокую стойкость к агрессивным средам, чем увеличивают срок службы нефтегазопроводов [149]. Положительную роль играют модификаторы в устранении негативного воздействия остающихся в расплаве газов [150]. Таким образом, модифицирование сталей можно использовать в производстве ответственных отливок для повышения его механических и эксплуатационных свойств.

Основная масса модификаторов изготавливаются на основе Si, [11, 12]. Чаще всего для модифицирования стали используют силикокальций, который хорошо раскисляет сталь и является активным глобуляризатором НВ [12, 153]. Концентрация кальция в расплаве от 0,014 до 0,016% достаточна для создания устойчивого модифицирующего эффекта [11]. Кальций значительно увеличивает жидкотекучесть и повышает пластичность и вязкость стали. Кроме Са, из ЩЗМ высокую эффективность как модификаторы демонстрируют Ва и Sr [11]. Они существенно расширяют потенциальные возможности модифицирования стали для ответственного литья.

Из редкоземельных металлов широкое применение в качестве раскислителя модификатора получили сплавы, содержащие Се, La и другие РЗМ [151]. Они отличаются высокой плотностью, что существенно облегчает их введение в жидкую сталь. Отечественные ученые ведут НИР по разработке новых лигатур [11, 157], исследуют влияние на модифицирующий эффект ряда элементов, таких как Zr, В и др. [158, 159]. Оптимизацию составов модификаторов проводят для дальнейшего повышения их эффективности, особенно в условиях Крайнего Севера [1, 7, 160].

Исходя из вышесказанного следует, что модифицирование стали лигатурами, содержащими кальций с добавками бария, стронция и РЗМ, будет способствовать повышению механических свойств при производстве ответственных отливок.

Распространенным способом повышения усвоения модификаторов является введение их вне печи в ковш, вглубь металлического расплава в полой проволоке с помощью трайб-аппарата, что повышает растворимость в стали ЩЗМ и других элементов, отличающихся низкими удельными массами и упругостями пара [155, 156]. **Этот способ ввода модификатора — один из наиболее приемлемых для производства ответственного литья. Он активно внедряется в литейных цехах. Однако способ требует дополнительных затрат и ввода дополнительного оборудования.**

Представляет интерес для обработки стали вне печи применение твердых шлаковых смесей [118]. При подаче их в ковш во время выпуска из печи происходит интенсивное перемешивание смеси и расплава за счет турбулентности потока металла, что способствует активизации, рафинированию стали. **На наш взгляд, этот способ можно применить для производства ответственного литья в печах с кислой футеровкой, а также для производства стали 110Г13Л методом переплава. Для этого необходимо разработать эффективную дисперсную рафинирующую смесь для ковшевой обработки сплавов, которая должна быть существенно дешевле модификаторов.**

Если во время проведения диффузионного раскисления в ДСП с основной футеровкой качественно раскислить металл, это обеспечит низкие концентрации серы и кислорода в стали и ее высокие механические свойства. Последующая операция ковшовой обработки усилит рафинирование металла, что в целом будет существенно дешевле модифицирования.

1.6. Модификаторы для внепечной обработки чугунов для отливок

Наиболее перспективным и ресурсосберегающим направлением улучшения структуры, повышения качества и свойств чугунных отливок является процесс модифицирования расплава. Под модифицированием понимают ввод в расплавленный металл на определенных технологических этапах различных модификаторов либо в виде сплавов, либо в виде смесей, обеспечивающих появление в расплавленном металле дополнительных центров кристаллизации, которые и решают задачу получения плотной, мелкозернистой и гомогенной структуры. Модифицирование чугуна обеспечивает получение более мелких включений графита и однородную структуру по сечению отливки, а следовательно, и повышение ее прочности.

Эффективных модификаторов для внепечной обработки чугунов очень много. Только графитизирующих добавок применяется свыше 150 [97]. Модифицирование выплавленного жидкого чугуна осуществляют присадками в него различных добавок непосредственно в ковш во время его заполнения или в форму. В производстве отливок из серого чугуна (СЧ) применяются главным образом графитизирующие модификаторы для устранения отбела. После модифицирования чугуна получаются отливки, в структуре которых заметно повышается дисперсность графита и перлита, что приводит к увеличению предела прочности при растяжении ($\sigma_в$) на 5–10%, при гарантированном отсутствии структурно-свободного цементита. Химический состав сплава при этом практически остается неизменным, так как модификаторы вводятся в весьма малых количествах от 0,1 до 0,5% от веса чугуна и новых компонентов в чугун обычно не вносят, но механические свойства чугуна резко возрастают [97].

Основными модифицирующими реагентами для чугунов являются различные сплавы на основе ферросилиция [164]. Особенность модифицирования СЧ ферросилицием отличается в ярко выраженной экстремальной зависимости графитизирующего эффекта от времени выдержки после обработки расплава. Высокая графитизирующая способность добавок ФС75 связана с процессами растворения присадки и образования избыточных углеродсодержащих фаз (графита или SiC) в высококремниевых зонах вокруг растворяющихся кусочков ферросилиция. Это объясняется тем, что Si является подобием C: он является главным поставщиком валентных электронов для недостроенной 3d-оболочки Fe [166]. Вместе с тем валентные электроны Si находятся дальше от ядра, чем у C, и мощнее отгорожены от ядра основными отрицательными частицами. В итоге связи Si с Fe существенно сильнее, чем у C. Поэтому атомы Si в жидком железе образуют вокруг себя «углеродный вакуум». Это повышает количество атомов C в свободном от Si пространстве. В связи с этим Si в жидких расплавах Fe–C–Si резко снижает растворимость C и становится активным графитизатором в чугуне [165]. Вышесказанное указывает на то, что Si необходимо рассматривать как один из

основных компонентов в создаваемых модификаторах для производства чугунных отливок.

Для повышения активности модификаторов перспективным видится ввод в расплав совместно с кремнием частиц углерода, которые по своему строению будут наиболее близки к выделяющимся при кристаллизации частицам графита чугуна.

Это подтверждают работы И. В. Гаврилина и его теория электронного строения расплавов [167] и работы В. И. Семенова, который предложил термодинамический механизм зарождения центров кристаллизации [226, 227].

На образование раствора атомы тратят часть своей парциальной энергии, и тем самым структурам металлического раствора придается определенный запас устойчивости. Парциальная энергия, потраченная атомами на образование структур жидкого чугуна, должна учитываться при формировании фрактальных зародышевых центров кристаллизации. Поскольку запас устойчивости структур зависит от типа действующих в металлическом растворе электронных связей, то, следовательно, добавка к раствору элементов с определенным типом связи должна оказывать влияние на устойчивость его структур и способна смещать температуру начала образования фрактальных зародышевых центров кристаллизации с последующим выделением этой фазы [226, 227].

1.6.1. Смесевые графитизирующие модификаторы для чугунных отливок

Перспективным направлением модифицирования чугунов является применение смесевых модификаторов. Смесевые реагенты экологически безопасны, дают преимущества в точности дозирования материала, не требуют операции плавления при производстве и имеют более низкую себестоимость, чем плавленые материалы. Каждый сплав содержит свое сочетание контролируемых и неконтролируемых примесей. Имея разную химическую активность и сродство к модификатору, очень трудно, а часто и невозможно подавить их негативное влияние каким-то одним модификатором. Этого недостатка лишен технологический процесс комплексного модифицирования, когда в расплав вводят не одну, а несколько добавок, обладающих различным модифицирующим действием. Достигаемый эффект становится более сильным и стабильным.

Резкий рост в чугунолитейном производстве индукционных агрегатов и ДСП, удешевление шихты за счет увеличения количества стального лома, а также рост температуры жидкого чугуна, приводят к уменьшению в выплавляемом металле количества активных зародышей и, как следствие, торможению графитизации, повышению отбеливаемости и образованию аномальных структур графита и феррита. Для увеличения количества зародышей графитовой фазы и подавления цементитных и аномальных структур обычные, часто применяемые модификаторы, оказываются малоэффективными.

В настоящее время промышленным способом изготавливают широкий спектр модификаторов для инокулирующей обработки СЧ, полученных на основе ферросилиция, а также смесевых модификаторов, содержащих дополнительно измельченный графит и карбид кремния.

Применение ультрадисперсных присадок графита в смесевые модификаторы позволяет значительно (в разы) увеличить графитизирующий эффект обработки жидкого чугуна данным модификатором. Требования отсутствия в литой структуре отливки включений цементита достигается при меньших (в 1,5–3 раза) расходах предлагаемого модификатора, по сравнению со стандартным модифицированием, при этом затраты на проведение операции модифицирования уменьшаются не менее чем на 20–30% [162]. За рубежом идут по пути ввода в смесевые модификаторы свободного С или SiC, создающих при контакте с жидким чугуном зародыши графита [167], которые являются устойчивыми в течение продолжительного времени и существенно увеличивают время действия модификатора [169, 170]. Особенно эффективны мелкодисперсные смесевые модификаторы. Примером служат МДМ модификаторы, успешно использующиеся при производстве отливок из ВЧ сэндвич процессом [171, 172].

Суммируя вышесказанное, можно сделать вывод, что для обеспечения эффективного графитизирующего модифицирования чугунов необходимо использовать смесевой комплексный модификатор на основе дисперсных порошков графита и кремния.

Не менее актуально приготовление дисперсных смесевых модификаторов, раскислительных и рафинирующих смесей для их применения при выплавке сталей.

На основании проведенного анализа состояния вопроса сформулировали цель исследования, представленного в монографии.

Выводы по главе 1

1. Выявлена основная номенклатура ответственных отливок в народном хозяйстве, для которых особенно актуально повышение эксплуатационной надежности. Прежде всего к ним относятся ответственные отливки для нужд РЖД.

Для повышения скорости движения и веса поездов необходимо повышать надежность крестовин железнодорожных и стрелочных переводов из стали 110Г13Л. Литые детали вагонных тележек надрессорные балки и боковые рамы из стали 20ГЛ должны обеспечить повышение нагрузки на ось с 23,5 до 25 тс. Корпуса фрикционные с увеличенным коэффициентом запаса сопротивления усталости из чугуна СЧ35. Большое внимание уделяется ответственным отливкам для автоматической сцепки железнодорожных вагонов из стали 20ГЛ, являющейся центрально-буферным ударно-тяговым сцепным прибором.

Повышаются требования также к ответственным хладостойким отливкам корпусным деталям трубопроводной арматуры для магистральных нефте- и газопроводов, изготавливаемые из стали 20ГЛ.

Необходимо повышать ресурс ответственных отливок из стали 110Г13Л: зубьев ковшей экскаваторов, гусеничных звеньев, рабочих органов дробильного оборудования, работающего в условиях низких температур.

Повысить эксплуатационную надежность проходческих комбайнов позволит повышение механических свойств наиболее нагруженных литых деталей «корпус турели», предназначенной для поворота стреловидного исполнительного органа, и «опора» для двух роликовых радиально-сферических однорядных подшипников, изготавливаемых из стали 35ХМЛ, а также литых корпусов и крышек редукторов из стали 25ГСЛ.

2. Один из надежных путей повышения механических свойств сталей и чугунов, а также эксплуатационной надежности отливок из них — это совершенствование печной и внепечной обработки расплавов.

3. В РФ и в зарубежной практике создано много лигатур, модификаторов, синтетических шлаков и твердых шлаковых смесей для модифицирования и рафинирования расплавов, но наиболее перспективными, на наш взгляд, является разработка модификаторов, раскислительных и рафинирующих смесей на основе дисперсных порошков.

4. Требуется разработка дисперсных смесевых реагентов и разработка на их основе ряда технологических решений по выплавке и внепечной обработке чугунов и сталей для ответственных отливок, обеспечивающих повышение их эксплуатационного ресурса.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ СОСТАВОВ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ВЫПЛАВКИ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОТЛИВОК ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Основной особенностью разрабатываемых новых технологий рафинирования и модифицирования сталей и чугунов является применение материалов, отличительным признаком которых являются дисперсность компонентов. Дисперсные и ультрадисперсные материалы все чаще применяют в литейном производстве для интенсификации металлургических процессов и повышения качества отливок [195–198]. Следует отметить, что достижение требуемого эффекта рафинирования представляет собой сложный процесс, в котором можно выделить два основных элемента — физический и физико-химический. Первый состоит в распределении реагентов в среде шлака и металла при подаче их в печь или в ковш с последующим образованием определенного числа контактов между компонентами смеси, металлом и шлаком. Очевидно, что здесь играют роль преимущественно физические характеристики разрабатываемых смесей — гранулометрия и удельная поверхность. Второй фактор заключается в процессах, обуславливающих рафинирование сталей и чугунов. Здесь компоненты смеси выступают как участники химического взаимодействия со шлаком и металлом. В этом случае имеет значение наличие в смеси компонентов, химически активных к шлаковой фазе, то есть физико-химическая природа компонентов. Рациональный подбор состава смесей делает предпочтительней дисперсную структуру компонентов с сильно развитой поверхностью и открытыми химическими связями, то есть химически активными.

Известно, что для достижения мелкозернистой структуры кристаллизующегося металла необходимо иметь в одном кубическом сантиметре расплава больше, чем 10^6 центров кристаллизации (ЦК) [15]. Разрабатываемые дисперсные материалы способны в процессе модифицирования и рафинирования внести в расплавы и шлаки сопоставимое количество дисперсных частиц, участвующих в реакциях и являющихся источниками ЦК, что резко повысит результативность обработки расплавов и шлаков.

2.1. Обоснование выбора основных компонентов для изготовления смесевых дисперсных реагентов

Материалом, представляющим наибольший интерес для использования в производстве, является углерод. Он один из наиболее распространенных элементов во Вселенной. Его содержание в земной коре составляет около 0,48 мас.% [183]. Углерод способен создавать чрезвычайно многообразный мир углеродсодержащих материалов (УСМ) от органических веществ до

сверхтвердого алмаза. Большие возможности у графита и фуллеренов на его основе.

УСМ можно рассматривать как один из обязательных и наиболее важных компонентов для изготовления раскислительных смесей, которыми обрабатываются шлаки ДСП при выплавке сталей во время восстановительного периода. Углерод является идеальным раскислителем, так как газообразный продукт раскисления CO удаляется из зоны реакции, не загрязняя при этом металл неметаллическими включениями. Очень важно, что в результате реакции и удаления CO из шлака последний вспенивается, что дает возможность извлечь массу преимуществ при грамотном ведении технологического процесса.

При изготовлении смесевых модификаторов для устранения цементита в структуре чугуна важно использовать компонент, кристаллографические параметры которого будут максимально тождественны графиту, выделяющемуся в жидком чугуне при кристаллизации. Таким компонентом также является С. Таким образом, углеродосодержащий материал (УСМ) является универсальным и пригодным для изготовления присадок при производстве чугунного и стального литья. В РФ много УСМ как естественных, так и искусственных [184, 185]. Однако все они отличаются повышенной зольностью и высоким содержанием серы, что существенно снижает эффективность модифицирования чугуна и раскисления стали. Поэтому нужна специфическая обработка УСМ, создающая наименьшее количество S, золы, а также диспергирование частиц [185].

Больше всего отличаются наименьшим количеством примесей УСМ после их графитации и механоактивации. Графитация производится при температурах до 3000 °С при отсутствии атмосферного воздуха. Высокотемпературная обработка УСМ позволяет снизить зольность до 1%, концентрацию серы до 0,05%. и обеспечить рентгенографию УСМ подобную решетке кристализующегося в чугуне графита [185]. Затем осуществляется механоактивация или тонкий помол, вызывающий резкую активацию материала [186].

Концентрации золы и S в УСМ при такой обработке продолжает резко уменьшаться, при одновременном повышении С, концентрации которого превышают 99%, улучшаются его физико-химические свойства за счет идеализации параметров решетки и аморфизации кристаллической структуры [187]. Зольность и S снижаются до уровня меньше 0,05% [188]. Такие параметры удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 56973 для графитизированных электродов [189]. Графитированные электроды являются важным элементом электродуговых печей при производстве стали и сплавов. Они поддерживают горение дуги между торцами электродов и металлом, и в определенной степени лимитируют производительность электропечных агрегатов. Современная модернизация электросталеплавильного производства путем интенсификации плавления лома в электрических печах с использованием мощных трансформаторов и внедрение внепечной обработки

стали существенно изменили условия эксплуатации электродов и, соответственно, резко повысились требования к их качеству. Поэтому в качестве сырья для их производства используются нефтяные и игольчатые пековые коксы, изготавливаемые из высококачественной малосернистой нефти и каменноугольных смол. В результате получается низкосернистый, малозольный графит. Такой УСМ следует использовать в производстве смесевых модификаторов для чугуна. Кроме того, для удешевления модификаторов в производственный процесс можно вовлекать аспирационные отходы образующихся при механической обработке графитизированных электродов и других высококачественных графитовых изделий.

При изготовлении раскислительных смесей, которые контактируют в основном со шлаковой фазой, требования к УСМ могут быть снижены. В данном случае можно использовать практически все сорта отсевов УСМ после дробления и помола, аспирационных сборов, а также молотых УСМ, цена которых, значительно ниже, чем высококачественного графита.

Вторым универсальным компонентом для изготовления раскислительных смесей и модификаторов целесообразно использовать дисперсный кремнийсодержащий материал (КСМ). Si — достаточно сильный и сравнительно недорогой раскислитель, поэтому он применяется в производстве практически всех марок стали и при всех способах производства стали — мартеновском, конвертерном, электросталеплавильном. В сталь Si вводят в виде ферросилиция с низким (10–20% Si) и высоким (45–75% Si) содержанием кремния. Достоинство Si как раскислителя состоит в его высоком химическом сродстве к кислороду, позволяющем получать сталь при остаточном содержании его в металле 0,15–0,3%, а также в способности образовывать нитриды (Si_3N_4) и предотвращать старение стали. Обычно для раскисления стали Si используют ферросилиций и силикомарганец различных марок.

Как было сказано ранее, Si при модифицировании чугуна служит эффективным графитизатором, как и С. Благодаря этой способности Si очень многие модификаторы для серого чугуна производятся на основе Si-содержащих ферросплавов. Модификаторы и раскислительные смеси, используемые в сталеварении, также содержат в своем составе Si. Поэтому в нашем случае выбор второго компонента модификатора был сделан в пользу мелкодисперсного кремнийсодержащего материала (КСМ).

Наша промышленность производит много КСМ в виде ферросплавов, Si кристаллического [190], а также КСМ являющихся побочным продуктом других производств. Вместе с тем перечисленные КСМ чаще всего дорогие. Кроме того, приготовление порошка из кондиционных КСМ требует дополнительных затрат и оборудования [191]. Представляет интерес порошок, содержащий 70–80% Si, как и ФС75. Он получается при производстве силанов. Порошок высокодисперсный и дешевый. Поэтому рационально именно его

использование в качестве КСМ вместе с УСМ для производства смесевого модификатора для чугунных отливок.

Следует отметить, что на предприятиях, производящих ферросплавы и другие КСМ при разделении материалов по фракциям и в результате работы приточно-вытяжной вентиляции образуются пылевидные КСМ [192]. По данным работы [192] количество дисперсных остатков может достигать от 2 до 4% от объемов, изготавливаемых КСМ. Принципиальная возможность утилизации и использования вышеперечисленных отходов для приготовления разрабатываемых смесей для сталеварения имеется, что будет удешевлять продукцию. Аспирационную пыль, которая возникает при дроблении ферросилиция высоких марок, можно использовать и в качестве графитизирующего модификатора.

Результативность порошков УСМ, КСМ может быть охарактеризована количеством частиц, которые они внесут в шлак и расплав при обработке ими жидких металла и шлаков в ванне печи и вне ее и создадут тем самым условия для увеличения скорости реакций раскисления и зарождения центров кристаллизации графита. Количество вносимых частиц напрямую зависит от зернового состава порошков. Средние размеры частиц следующие: КСМ, полученного при производстве силанов, — 17,12 мкм, а УСМ после отжига и тонкого помола — 13,21 мкм. Расчеты размеров производились по разработанной методике, подробно описанной в монографиях [263, 18]. Поверка на лазерном микроанализаторе зафиксировала сопоставимые итоги.

Смесь мелкодисперсных порошков УСМ и КСМ обеспечит все требуемые параметры модифицирования серого чугуна, что следует из данных работы [15], где теоретически доказано и экспериментально подтверждено, что для достижения в отливке мелкодисперсной аустенитной структуры необходимо иметь в расплаве не менее 10^6–10^8 шт/см^3 центров кристаллизации, что достигается уже при вводе 0,1% от массы жидкого металла порошка со средним размером 15 мкм.

Эффективность диспергирования компонентов для смесевых модификаторов подтверждена моделированием поведения дисперсных частиц в расплаве при заполнении им полости литейной формы, для чего использовали программу FLOW-3D. Подробно математическое моделирование описано в работах [18, 262, 263].

Для моделирования применили технологию формы, ответственной железнодорожной отливки «клин фрикционный», изготавливаемой из чугуна СЧ30. В форме симметрично поместили четыре отливки (рис. 2.1), что дало возможность моделировать наполнение чугуном и модификатором 1/4 части литейной формы, то есть одного клина фрикционного [262].

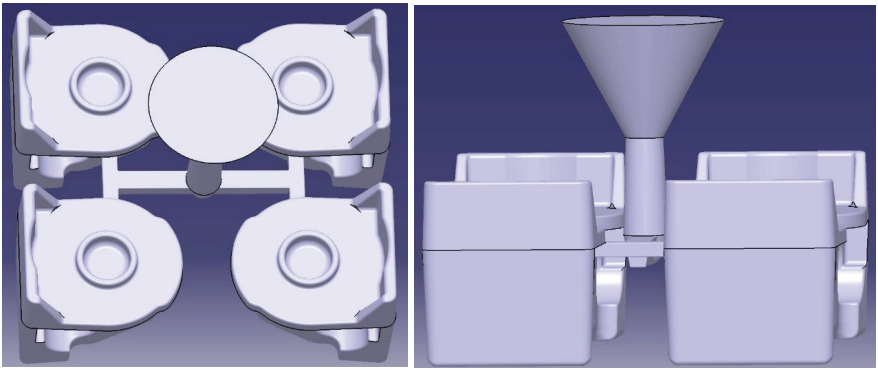


Рисунок 2.1. Расположение отливок «клин фрикционный» в форме

Для математического моделирования процесса заполнения формы расплавом была использована система уравнений гидродинамики Навье — Стокса, дополненная уравнением неразрывности.

Течение жидкостей: металлического расплава и газовой среды — описывается системой гидродинамических уравнений Навье — Стокса и уравнения неразрывности в приближении вязкой жидкости, сжимаемой для газовой фазы и несжимаемой для расплава.

$$\rho_i \frac{du_i}{dt} = -\frac{\partial P_i}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left[\mu_i\left(2\frac{\partial u_i}{\partial x} - \frac{2}{3}div\omega\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu_i\left(\frac{\partial u_i}{\partial y} + \frac{\partial v_i}{\partial x}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu_i\left(\frac{\partial \omega_i}{\partial x} + \frac{\partial u_i}{\partial z}\right)\right];$$

$$\rho_i \frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial P_i}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu_i\left(2\frac{\partial v_i}{\partial y} - \frac{2}{3}div\omega\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu_i\left(\frac{\partial v_i}{\partial z} + \frac{\partial \omega_i}{\partial y}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x}\left[\mu_i\left(\frac{\partial u_i}{\partial y} + \frac{\partial v_i}{\partial x}\right)\right]$$

$$\rho_i \frac{d\omega_i}{dt} = -\frac{\partial P_i}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu_i\left(2\frac{\partial \omega_i}{\partial z} - \frac{2}{3}div\omega\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x}\left[\mu_i\left(\frac{\partial \omega_i}{\partial x} + \frac{\partial u_i}{\partial z}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu_i\left(\frac{\partial v_i}{\partial z} + \frac{\partial \omega_i}{\partial y}\right)\right] + g\rho_i;$$

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i u_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_i v_i)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_i \omega_i)}{\partial z} = 0;$$

где u, v, w — компоненты вектора скорости;
ρ — плотность расплава, кг/м^3;
μ — коэффициент динамической вязкости расплава, Па·с;

P — давление, Па;
t — время, с;
g — вектор гравитации, м/с^2.

В уравнениях (2.1) для несжимаемого расплава принимается ρ=const.

Добавили также уравнения Фурье для перемещения тепловых потоков в форме и Фурье — Кирхгофа для теплопереноса в металле.

$$\frac{\partial T_ф}{\partial t} = a_ф \left(\frac{\partial^2 T_ф}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_ф}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_ф}{\partial z^2} \right),$$

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} + u \frac{\partial T_p}{\partial x} + v \frac{\partial T_p}{\partial y} + \omega \frac{\partial T_p}{\partial z} = a_p \left(\frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial z^2} \right);$$

Гидродинамические граничные состояния следующие:

- На поверхности внутри литейной формы применили правило «прилипания» расплава к стенкам: $Vx_{ст} = Vy_{ст} = Vz_{ст} = 0$.
- На входе в литниковую систему установили следующую скорость течения расплава: $Vx_{лс} = Vy_{лс} = 0$; $Vz_{лс} = W$,

где W — вертикальная скорость струи металла при заполнении формы, м/с.

Тепловые граничные состояния, следующие:

- На входе в литниковую систему температура металла равнялась температуре заливки: $t_{м} = t_{зал}$.
- На поверхности внутри литейной формы применили граничное условие III рода:

$$-\lambda_м \left(grad_m t_p \right)_{ст} = \frac{\lambda_{кр}}{l_{кр}} \left(t_p - t_ф \right)_{ст};$$

$$-\lambda_ф \left(grad_m t_ф \right)_{ст} = \frac{\lambda_{кр}}{l_{кр}} \left(t_ф - t_p \right)_{ст},$$

где $\lambda_м$, $\lambda_ф$, $\lambda_{кр}$ — теплопроводности металла, формы и противопригарной краски внутри формы, Вт/(м·К);

$l_{кр}$ — толщина краски, мм;

$\left(grad_m t_p \right)_{ст}$ и $\left(grad_m t_ф \right)_{ст}$ — проекции температурного градиента в расплаве и форме непосредственно на внутренней поверхности формы на направление нормали m к этой поверхности;

$\left(t_p \right)_{ст}$, $\left(t_ф \right)_{ст}$ — температуры расплава и литейной формы на внутренней поверхности этой формы, К.

• На внешней поверхности формы также применили граничные условия III рода:

$$-\lambda_{\phi}\left(grad_m t_{\phi}\right)_{oc} = \alpha_{oc}\left(t_{\phi} - t_{oc}\right)_{oc},$$

где α_{oc} — коэффициент теплоотдачи от формы в окружающую среду кДж/м^{2}час°С;

$\left(grad_m t_{\phi}\right)_{oc}$ — проекция температурного градиента в форме непосредственно у ее внешней поверхности на направление нормали m к этой поверхности;

$\left(t_{\phi}\right)_{oc}$, $\left(t_{oc}\right)_{oc}$ — температуры формы и окружающей среды на внешней поверхности формы, К.

Для заливки форм выплавляли серый чугун марки СЧ30. Формы изготавливались из сырых песчано-глинистых смесей:

Моделировали заливку чугуна марки СЧ30 со следующими теплофизическими свойствами: λ_p=39 Вт/(м·К); c_p=841 Дж/(кг·К); ρ_p=7360 кг/м^3; $t_{зал}$=1415 °С; $t_{лик}$=1230 °С; $t_{сол}$=1140 °С; Т заполнения формы 22 с. Форму изготавливали из песчано-глинистой смеси: $t_{ф}$=25 °С, λ_{ϕ}=0,712 Вт/(м·К); c_p=1133 Дж/(кг·К); ρ_p=1595 кг/м^3; $\lambda_{кр}$=0,19 Вт/(м·К); $l_{кр}$=0,29 мм.

Для моделирования движения кусочков модификатора наряду с системами уравнений Фурье использовали уравнения движения гранул в потоке жидкого чугуна.

$$\frac{\partial Vx_p}{\partial t} + u\frac{\partial Vx_p}{\partial x} + v\frac{\partial Vx_p}{\partial y} + \omega\frac{\partial Vx_p}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_p}\frac{\partial P}{\partial x} + \chi(Vx - Vx^1) + \gamma(Vx - Vx^1)\cdot|Vx - Vx^1|;$$

$$\frac{\partial Vy_p}{\partial t} + u\frac{\partial Vy_p}{\partial x} + v\frac{\partial Vy_p}{\partial y} + \omega\frac{\partial Vy_p}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_p}\frac{\partial P}{\partial y} + \chi(Vy - Vy^1) + \gamma(Vy - Vy^1)\cdot|Vy - Vy^1|; \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial Vz_p}{\partial t} + u\frac{\partial Vz_p}{\partial x} + v\frac{\partial Vz_p}{\partial y} + \omega\frac{\partial Vz_p}{\partial z} = g - \frac{1}{\rho_p}\frac{\partial P}{\partial z} + \chi(Vz - Vz^1) + \gamma(Vz - Vz^1)\cdot|Vz - Vz^1|;$$

$$Vx^1 = Vx_p + Vx_{diff}; \quad Vy^1 = Vy_p + Vy_{diff}; \quad Vz^1 = Vz_p + Vz_{diff}, \quad (2.9)$$

где Vx_p, Vy_p, Vz_p, ρ_p — компоненты вектора скорости и плотность частицы, м/с, кг/м^3;

χ, γ — коэффициенты сопротивления, отнесенные к массе m частицы; Vx_{diff}, Vy_{diff}, Vz_{diff} — компоненты вектора скорости диффузии частицы, м/с. Каждая из этих компонент определяется по формуле:

$$\mathrm{Vx}_{diff} = D_p \frac{\nabla(mC)}{mC}, \tag{2.10}$$

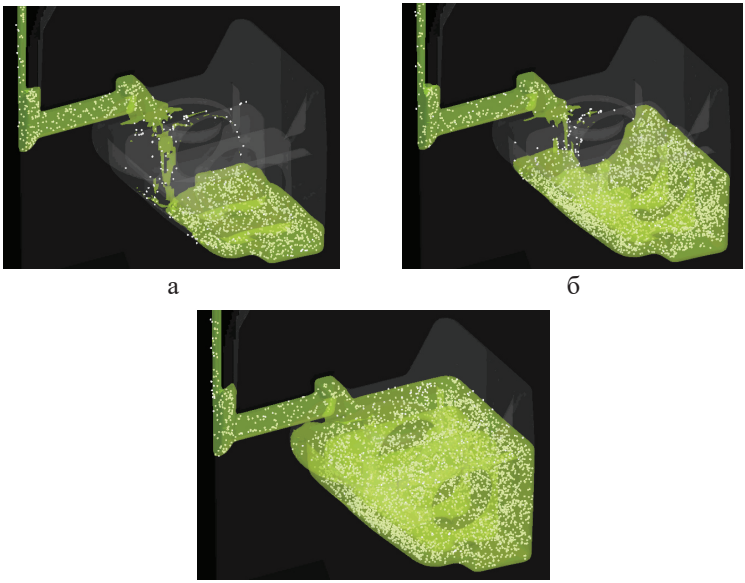
где C — концентрация частиц, кг/м^3;

D_p — коэффициент диффузии частиц, см^2/с.

Модификатор МК21 смесевой. Основу его составляют частицы УСМ и КСМ. Для каждой из них выполняли индивидуальные расчеты. Произвели также расчеты для кусочков ФС75, чтобы сравнить их поведение с дисперсными частицами. Размеры и плотность гранул в процессе заполнения формы чугуном принимались постоянными. Гранулы КСМ, УСМ и ФС75 моделировали как идеальные сферы с параметрами равными их средним величинам в модификаторе. Средние диаметры гранул УСМ и КСМ равны 13,21 и 17,12 мкм соответственно, ФС75 — 5,5 мм. Плотность материалов следующая: КСМ — 2,46 г/см^3; УСМ — 2,19 г/см^3; ФС75 — 3,46 г/см^3. Время заливки формы 22 секунды. Для описания закономерностей поведения частиц в масштабе отливки принимали наличие в расплаве 3,49 шт/см^3 кусочков каждого материала, что уменьшило компьютерное время расчетов, но вместе с тем это было соразмерно для выявления общих закономерностей действия кусочков в полости отливки. В чугуне, на входе в литниковую систему, задавалось произвольное первичное рассредоточение гранул.

Анализ поведения гранул модификаторов проводили в наклонной и вертикальных стенках корпуса фрикционного в нижнем, среднем и верхнем его фрагментах во время подъема металла и модификатора в отливке при заполнении формы. Порядок расположения крупинок УСМ в отливке в процессе заполнения отливки жидким чугуном показано на рис. 2.2.

Как видно на рис. 2.2, частицы УСМ равномерно распределялись по всему объему отливки на всех наблюдаемых высотах контролируемых стенок. Моделирование позволило выявить, что частицы УСМ и КСМ в отливке в процессе заполнения формы ведут себя подобным образом, так как материалы близки по плотности и размерам. В результате можно с уверенностью утверждать, что выявленные закономерности расположения гранул будут соблюдаться и при применении смеси из КСМ и УСМ. Кусочки УКМ и УСМ служат центрами кристаллизации в течение всего времени затвердевания отливки, что и обеспечивает отсутствие отбела в контролируемых стенках отливки [18]. Отливка будет качественно модифицирована, и с течением времени эффект модифицирования будет сохраняться, так как дисперсные частицы присадки практически не контролируются гравитацией.



а б в

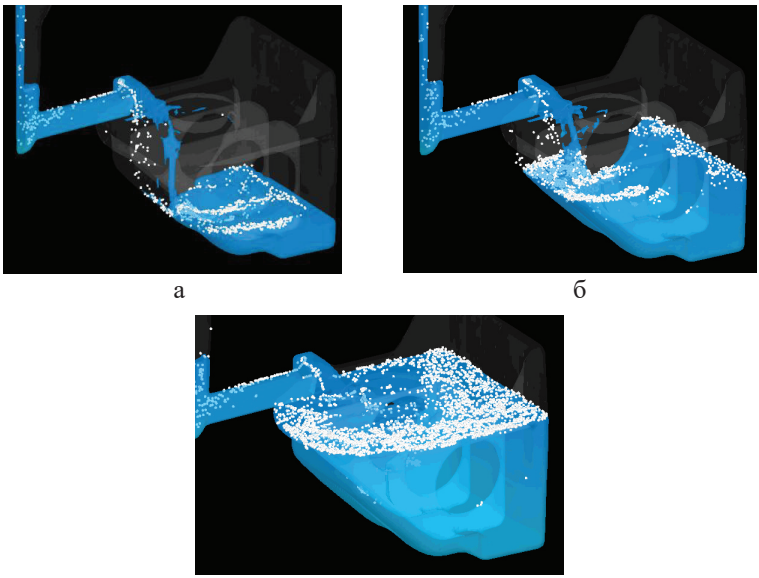
Рисунок 2.2. Расположение гранул УСМ в заготовке:
а — в начале заливки; б — в середине; в — в конце

По результатам моделирования, изображенным на рис. 2.3, видно, что крупные гранулы ФС65, в отличие от дисперсных УСМ и КСМ, сразу же всплывают на поверхность жидкого чугуна и в конце заполнения формы оказываются в основном в верхней стенке отливки. Эта стенка оказывается наиболее модифицированной.

Таким образом, выбранное расположение отливок в форме определяет высокую вероятность возникновения отбела в наклонной и вертикальных стенках, что и подтвердил в дальнейшем производственный опыт [18, 286].

Моделированием показано, что для эффективного модифицирования необходимо наличие в модификаторе дисперсных частиц Si и C.

Дисперсные УСМ и КСМ послужили надежной основой для создания комплексных модификаторов и раскислительных смесей, обладающих высокой результативностью. Для них разработаны технические условия ТУ 24.10.12-001-52044633-2025. «Комплексные модификаторы, науглероживатели, раскислительные смеси для литейного и металлургического производства». Технические условия зарегистрированы в Центре стандартизации и метрологии. Материалы помещены в банк данных «Продукция России», который ведет ФГУП «Стандартинформ». Каталожный лист продукции № 004847. Модифицирующая смесь для чугуна: запатентована [220].



а б в

Рисунок 2.3. Расположение гранул ФС75 в заготовке:
а — в начале; б — в середине; в — в конце заливки

В качестве еще одного компонента для изготовления смесевых модификаторов и рафинирующих добавок выбран кальций-стронциевый карбонат — КСК. Отличительной чертой его является дисперсность частиц. Средний размер частиц $CaCO_3$ составляет 19,6 мкм~20 мкм. Преимущества измельчения карбоната кальция — основной составляющей КСК — доказаны ниже приведенными расчетами, которые дают оценку изменению реакционной способности порошков с разной дисперсностью [202].

Рассмотрим два порошка $CaCO_3$ с радиусами r_1 и r_2. Принимаем условно, что их гранулы имеют идеальную сферическую форму. Известно, что объем одного моля вещества — величина, получающаяся от деления молярной массы на плотность. $V=M/\rho$. Он характеризует плотность упаковки молекул. Принимая во внимание, что радиусы всех частичек равны между собой, определим число гранул, находящихся в 1 моле изучаемых карбонатов:

$$n_1 = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi\rho r_1^3} \; ; \qquad (2.1)$$

$$n_2 = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi\rho r_2^3}\ , \tag{2.2}$$

где М — молекулярная масса, кг/моль;
ρ — плотность порошка, кг/м^3.

Затем подсчитаем общую площадь поверхности гранул с размерами r_1 и r_2, и свободные поверхностные энергии F^S:

$$S_1 = \frac{4\pi r_1^2 V}{\frac{4}{3}\pi r_1^3} = 3\frac{V}{r_1}; \tag{2.3}$$

$$F_1^s = \frac{3\sigma V}{r_1}; \tag{2.4}$$

$$S_2 = \frac{4\pi r_2^2 V}{\frac{4}{3}\pi r_2^3} = 3\frac{V}{r_2}; \tag{2.5}$$

$$F_2^s = \frac{3\sigma V}{r_2}, \tag{2.6}$$

где s_1 — площадь поверхности частиц радиусом r_1 в объеме V, м^2;
s_2 — площадь поверхности частиц радиусом r_2 в объеме V, м^2**.**

Разная эффективность порошков воплощается как разность значений их свободной поверхностной энергии в виде изотермической разности химических потенциалов. В результате в расчете на 1 г/моль растворов имеем:

$$\mu_1 - \mu_2 = \Delta\mu = \sigma\,(S_1 - S_2) = \sigma\left(\frac{3V}{r_1} - \frac{3V}{r_2}\right), \tag{2.7}$$

где μ — химический потенциал компонентов, Дж/моль.

С другой стороны, для первого порошка приближенно можно записать

$$\mu_1 = \mu_0 + RT\ln a_1, \tag{2.8}$$

где μ_0 — химический потенциал компонентов в стандартном его состоянии, Дж/моль;
R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль К);
T — температура, К;
a — активность.

Для другого порошка имеем:

$$\mu_2=\mu_0 + RT\ln a_2, \tag{2.9}$$

тогда

$$\mu_1 - \mu_2=\Delta\mu = RT\ln\frac{a_1}{a_2}. \tag{2.10}$$

Приравняв правые части выражений (2.7) и (2.10), получаем:

$$RT\ln\frac{a_1}{a_2} = \sigma\left(\frac{3V}{r_1} - \frac{3V}{r_2}\right);$$

$$\ln\frac{a_1}{a_2} = \frac{3V\sigma}{RT}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right), \text{ или}$$

$$\ln\frac{a_1}{a_2} = \frac{3M\sigma}{RTd}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right). \tag{2.11}$$

При диссоциации порошков разность величин их свободной поверхностной энергии исполняется в виде изотермической работы диссоциации. В итог, в расчете на один грамм моль растворов получаем:

$$A_1 - A_2=\Delta A=\sigma\,(S_1 - S_2)=\sigma\left(\frac{3V}{r_1} - \frac{3V}{r_2}\right). \tag{2.12}$$

С другой стороны, для карбоната с радиусом частиц r_1 приближенно можно записать как

$$A_1=A_0 + RT\ln K_{p1}. \tag{2.13}$$

Для другого карбоната с радиусом частиц r_2 имеем:

$$A_2=A_0 + RT\ln K_{p2}, \tag{2.14}$$

тогда

$$A_1 - A_2=\Delta A = RT\ln\frac{K_{p1}}{K_{p2}}. \tag{2.15}$$

Приравняв правые части выражений (2.12) и (2.15), получаем:

$$RT\ln\frac{K_{p1}}{K_{p2}}=\sigma\left(\frac{3V}{r_1}-\frac{3V}{r_2}\right);$$

$$\ln\frac{K_{p1}}{K_{p2}}=\frac{3V\sigma}{RT}\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right),$$

или

$$\ln\frac{K_{p1}}{K_{p2}}=\frac{3M\sigma}{RTd}\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right). \qquad (2.16)$$

Из уравнений (2.22 и 2.26) вытекает, что при уменьшении размеров частиц твердого тела активность системы и процесс диссоциации карбонатов усиливается. Таким образом, можно утверждать: чем дисперснее система, тем выше ее реакционная способность или физико-химическая активность. Результаты расчетов и выводы согласуются с данными работы [204].

Главная и самая важная характерная черта дисперсного состояния заключается в том, что значительная доля свободной энергии системы сконцентрирована в межфазных поверхностных слоях. Сравнили удельную свободную энергию КСК с ближайшим аналогом, широко применяемым барий-стронциевым карбонатом (БСК). Удельная площадь межфазной поверхности вычисляется по формуле [193].

$$S_{уд}=\frac{S_{1,2}}{V_1}=\frac{4\pi r^2}{\frac{4}{3}\pi r^3}=\frac{3}{r}=\frac{6}{d}, \qquad (2.17)$$

где $S_{уд}$ — удельная площадь межфазной поверхности, $см^{-1}$.

Размер кусочков БСК колеблются от одного до 10 мм, в среднем 5,5 мм [205]. $S_{уд}$ смеси КСК будет равняться 3000 $см^{-1}$, а $S_{уд}$ БСК равно 10,9 $см^{-1}$, то есть в 275,2 раза меньше. Избыток свободной энергии делает дисперсные системы термодинамически неустойчивыми. Для них характерны самопроизвольные процессы, стремящиеся снизить этот избыток различными путями. Таким образом, избыток свободной энергии КСК будет потрачен на увеличение его реакционной способности, а, соответственно, и на кинетические характеристики реакций по сравнению с БСК.

Приращение энергии Гиббса при изменении дисперсности вычисляется по формуле [217]:

$$\Delta Gg=\pm\frac{2\sigma Vm}{r}, \qquad (2.18)$$

где ΔGg — приращение энергии Гиббса, Дж;
Vm — мольный объем, $м^3$/моль;
σ — поверхностное натяжение, Дж/$м^2$.

Из уравнения (2.18) следует, что увеличение реакционной способности материала пропорционально 1/r или дисперсности системы.

Таким образом, с уменьшением размера частиц с 5,5 см до 0,002 см реакционная способность, а значит, и интенсификация химических взаимодействий возрастет в $\frac{1}{r_{КСК}} / \frac{1}{r_{БСК}} = \frac{1}{0,001} / \frac{1}{2,75} = 2777\,раз$.

В результате избыток свободной энергии будет потрачен на изменение химического состояния вещества, то есть на диссоциацию карбонатов. Диссоциация КСК будет максимально облегчена и произойдет значительно быстрее, чем в ближайшем аналоге кусковом БСК.

Эффективность КСК подтверждена многими исследованиями и при рафинировании чугунов и сталей [200–201]. Для удобства ввода модификатора КСК его закатали в порошковую проволоку ПП-ТС14КСК диаметром 14 мм и вводили с помощью трайб-аппарата со скоростью 100 метров в минуту в ковш емкостью 25 тонн. Израсходовано 60 метров проволоки из расчета 500 грамм КСК на одну тонну металла, что значительно ниже, чем при применении близкого по составу БСК.

Для подтверждения рафинирующей способности газа, образующегося при диссоциации карбоната в программном комплексе FLOW-3D® — гидродинамическом пакете общего назначения произвели моделирование процесса удаления оксидов алюминия с помощью, всплывающих в металлическом расплаве, пузырьков газа.

Рафинирующую способность газа, образующегося при диссоциации карбоната, подтвердили в программном комплексе FLOW-3D® — гидродинамическом пакете общего назначения. Произвели моделирование процесса удаления оксидов алюминия с помощью, всплывающих в металлическом расплаве, пузырьков газа.

Главная цель моделирования — расчет всплытия пузырьков газа в металлическом расплаве, захват ими включений, которые в этом расплаве присутствуют, и выведение их на поверхность [258].

В качестве расплава использовали сталь 20ГЛ с плотностью ρ_p=7000 кг/$м^3$ и температурой $T_{сплава}$=1580 °С. Для сокращения затрат машинного времени была рассмотрена следующая модельная ситуация. Столб расплава высотой 50 мм и поперечным сечением 20×20 мм с газовой «шапкой» над ним высотой 10 мм (с тем же поперечным сечением). На высоте от основания столба 10 мм, на его оси располагали газовый пузырек с внутренним давлением 0,145МПа. На пути всплытия пузырька, то есть на оси столба расплава на высотах 30 мм и 35 мм от основания столба размещали частицы включения диаметром 1,6 мм (рис. 1). Размер включений приближен к максимальному, что усложняет эвакуацию их из расплава. Выполняли

несколько моделирований для различных диаметров пузырька от 3,0 мм до 4,4 мм и сравнивали их способность захватывать и выносить на поверхность различные количества частиц включений. Вышеперечисленных данных достаточно для описания закономерностей поведения частиц оксидов алюминия в масштабе ковша.

Моделирование процесса проводили в программном комплексе FLOW-3D® — гидродинамическом пакете общего назначения, который много и успешно используется для решения различных литейных и металлургических задач. В терминах FLOW-3D® задачу моделировали в постановке двух жидкостей (металлический расплав и газовая среда) с поверхностью раздела между ними и учетом поверхностного натяжения. При этом расплав считался жидкостью несжимаемой, а газовая среда, которой моделировали газовую «шапку» и газовый пузырек, считалась жидкостью сжимаемой. Поведение частиц включения в расплаве описывали моделью GMO (General Moving Object) — свободного движения твердого тела в потоке[259], а поверхность раздела расплав — газовая фаза рассчитывали с помощью VOF (volume-of-fluid) метода [260, 261]. Так как главная цель моделирования не связана с теплопереносом, этой частью реального процесса в моделировании пренебрегали.

Система гидродинамических уравнений Навье — Стокса дополняется следующими начальными и граничными условиями.

1. Давление в газовой «шапке» и расплаве в начальный момент времени равно атмосферному. Начальное давление в газовом пузырьке — 0,145 МПа.

2. На внешних сторонах расчетной области — гранях столба расплава с газовой «шапкой», задано условие симметрии.

3. На границах раздела расплав — газовая фаза учитывается поверхностное натяжение в соответствии с формулой Лапласа:

$$p_p = p_г + \sigma\left(1/r_1 + 1/r_2\right), \tag{2.19}$$

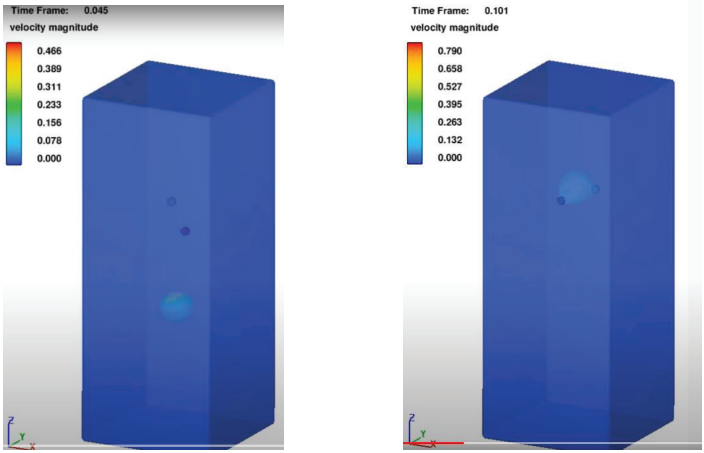
где σ — коэффициент поверхностного натяжения;

r_1 и r_2 — ортогональные радиусы главных кривизн свободной поверхности, мм.

4. На границах контакта расплава с частицами принимается условие «прилипания», т. е. скорость расплава на твердых стенках частиц равна скорости движения этих частиц.

Моделированием в программном комплексе FLOW-3D® подтвердили также рафинирующую способность образующегося газа флотацией НВ в стали 20 ГЛ [280].

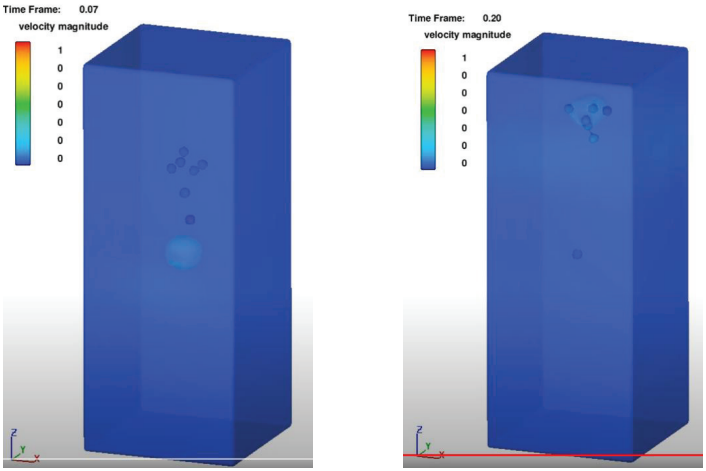
Результаты моделирования показали, что пузырек рафинирующего газа диаметром 3,0 мм, всплывая, захватывает две частицы оксида алюминия, но подъемной силы не хватает, чтобы их удержать и вынести на поверхность (рис. 2.4).



а б

Рисунок 2.4. Результаты моделирования рафинирования стали 20ГЛ:
а — газовый пузырек в начале пути; б — ассимиляция двух частиц

При увеличении диаметра пузырька до 3,6 мм подъемной силы становится достаточно, чтобы обеспечить удаление этих частиц из расплава. При диаметре пузырька 4,4 мм подъемной силы хватает уже для захвата пяти частиц из семи и успешного подъема их на поверхность расплава (рис. 2.5а, 2.5б).



а б

Рисунок 2.5. Результаты моделирования рафинирования стали 20ГЛ:
а — газовый пузырек и 7 частиц; б — захват и вынос 5 частиц

На неметаллические включения, соприкасающиеся с поверхностью пузырька газа, действуют силы поверхностного натяжения, удерживают их при всплывании и увлекают частицы оксидов за собой, вынося их на поверхность расплава, где сам пузырек исчезает, переходя в газовую фазу (рис. 2.5б).

Таким образом, моделированием в программном комплексе FLOW-3D подтверждена флотирующая способность образующегося газа для очистки расплава от НВ, которая осуществляется тем успешнее, чем больше будет пузырьков газа и меньше их размер, а также чем равномернее их распределение в объеме жидкого металла.

КСК послужил надежной основой для создания флюсов и рафинирующих добавок, обладающих высокой результативностью. На КСК разработаны технические условия ТУ 24.10.12-002-52044633-2025. «Модификатор КСК и рафинирующие смеси на его основе для литейного и металлургического производства». Технические условия зарегистрированы в Центре стандартизации и метрологии. Модификатор КСК и материалы на его основе помещены в банк данных «Продукция России», который ведет ФГУП «Стандартинформ». Каталожный лист продукции № 004848. Подана заявка на изобретение № 2025127044 РФ: МПК 21С51/52 Модификатор КСК — кальций-стронциевый карбонат (заявлена 02.10.2025 / Чайкин А. В.).

Модификатор КСК уже хорошо зарекомендовал себя как эффективная рафинирующая и модифицирующая добавка для производства ответственных отливок из стали и чугуна [200]. В процессе исследований установлено положительное влияние обработки стали 20ГЛ модификатором КСК на структуру и свойства стали 20ГЛ при производстве ответственных железнодорожных отливок «рама боковая» и «балка надрессорная» в условиях ООО «Промтрактор-Промлит» [218]. Рафинирующая обработка расплава КСК оказала благоприятное влияние на неметаллические включения. Количество их стало меньше, а форма и расположение их оказались более благоприятными. Существенно увеличились механические свойства стали 20ГЛ, особенно структурно чувствительная величина — ударная вязкость при отрицательных температурах. KCU^{-60} увеличилась с 480 до 650 кДж/м^2, то есть на 26,1%, а KCV^{-60} — со 120 до 200 кДж/м^2 на 40% [218], что очень важно для повышения надежности и долговечности железнодорожных деталей.

2.2. Обоснование преимуществ раннего наведения шлака

Тщательно изучив, технологию выплавки стали 110Г13Л методом переплава выявили, что в связи с высокой температурой плавления извести наведение шлака при этом методе затруднено. Шлакообразование является наиболее медленным процессом плавки и во многом определяет величину потерь теплоты и металла, замедляет процесс рафинирования, что негативно сказывается на всем последующем ходе плавки. При методе переплава проблемы шлакообразования подробно описаны в главе 1.

Процесс плавления длится от 60 до 90 минут. При методе переплава металл при плавлении и нагреве до температуры плавления насыщается азотом и водородом примерно от 50 до 70% от их содержания в шихте. Неудовлетворительно очищенная шихта и заправочные материалы увеличивают содержание неметаллических включений в металле в 5–7 раз [74]. Кроме того, во время плавления происходит обильное окисление марганца и железа, что приводит к повышенному содержанию оксидов этих металлов в шлаке. Их концентрации могут достигать 40 и 10% соответственно. В результате во время восстановительного периода часто не удается провести качественное рафинирование такого шлака, и зачастую суммарное количество MnO и FeO в шлаке существенно превышает оптимальный уровень пять процентов, что снижает жидкотекучесть, пластические характеристики, ударную вязкость и износостойкость стали. Возрастает количество брака по причинам «горячая трещина» и «спай» при одновременном увеличении затрат на производство.

Установив причины появления вышеперечисленных недостатков, пришли к выводу, что при плавке стали методом переплава необходим комплексный подход к рафинированию стали, который начинается в самом начале плавления шихты, затем во время диффузионного раскисления плавки и, наконец, вне печи ковшовой обработкой.

Вначале плавки необходима организация раннего наведение шлака. Для этого разработан смесевой флюс «разжижитель шлака» (РШ) [200], который необходимо загружать на поверхность извести перед завалкой лома Б 22, что способствует раннему наведению шлака.

В качестве основного компонента флюса РШ выбрали кальций-стронциевый карбонат (КСК)**.** Для повышения эффективности РШ к основному компоненту дисперсному КСК добавили флюс на основе хлоридов натрия и калия (NaCl-KCl). Этот покровный флюс представляет собой смесь хлоридов натрия и калия в сочетании (1:1). Эквимольная смесь этих солей имеет невысокую температуру плавления от 650 до 660° С) [206, 207]. Эти флюсы применяют при производстве цветных сплавов. Они являются наиболее технологичным и эффективным средством рафинирования алюминиевых сплавов в литейных цехах, изготавливающих фасонные отливки. Важно, что смесь хлоридов натрия и калия способна адсорбировать оксид алюминия и растворять его [208]. Это дало возможность дополнительно ввести в состав разжижителя шлака глинозем Al_2O_3. Как известно, глинозем разжижает металлургические шлаки. Добавки Al_2O_3 ускоряют растворение извести и понижают вязкость шлака [112]. Все компоненты РШ имеют дисперсность сопоставимую с КСК и тщательно перемешиваются.

При загрузке печи на подину загружается известь. РШ равномерно распределяется по поверхности извести. Благодаря дисперсности он заполняет поры на кусках извести и пустоты между кусками извести. Это впоследствии предохраняет известь от спекания и уменьшения поверхности.

Как только загораются электрические дуги, начинает плавиться сталь и формироваться шлак. В реакционной зоне горения дуги создается очень высокая температура — выше 20000 °С, существует избыток кислорода воздуха, поэтому на поверхности металл-газ протекают окислительные реакции [208].

$$n[Me] + \{O_2\} = m(Me_xO_y); \quad (2.20)$$

$$2[C] + \{O_2\} = 2\{CO\}. \quad (2.21)$$

Образующиеся оксиды формируют шлак. Он состоит из продуктов окисления металла (MnO, FeO, SiO_2, Fe_2O_3) и растворяющихся в них других оксидов, вносимых ржавчиной стального лома и футеровкой. Электроды прорезают колодцы в шихте, и основа будущего шлака стекает на поверхность РШ на подину печи. На поверхности РШ намораживается пленка. Образование пленки сопровождается образованием твердых и жидких растворов, а также химических соединений системы CaO-FeO-MnO-SiO_2. Механизм дальнейшего шлакообразования следующий. При нагреве флюса РШ до температуры 680 °С начинают плавиться NaCl-KCl. Они растворяют в себе глинозем, дисперсный КСК и плавиковый шпат и оксиды металла. Образующаяся жидкость хорошо смачивает куски извести, поры и предохраняет известь от спекания. Это облегчает диффузию ионов оксидов железа и марганца к сердцевине куска извести, где образуются легкоплавкая R фаза. Кроме того, образующийся легкий жидкоподвижный шлак поднимается в прорезаемых электродами колодцах и экранирует дуги. После этого все тепло дуг расходуется на нагрев плавящегося металла и шлака. Резко сокращается угар Mn и Fe. Для качественного и количественного анализа динамики процесса растворения извести в работе [208] предложено следующее уравнение:

$$V_{CaO} = k(CaO + 1{,}35MgO - 1{,}09SiO_2 + 2{,}75FeO + \\ + 1{,}9MnO - 39{,}1)\cdot\exp\left\{-\frac{2550}{T}\right\} V_C^{0,7} G^{0,5}, \quad (2.22)$$

где k — коэффициент пропорциональности;
V_C — скорость окисления углерода;
T — температура, °С;
G — масса извести.

Как видно, решающая роль в скорости растворения извести принадлежит концентрациям FeO и MnO, которых при плавке 110Г13Л всегда достаточное количество. MgO вносится футеровкой. Положительную роль оказывает количество CaO.

Качественный скачок в увеличении скорости растворения извести начинается при 950 °С. В это время начинается диссоциация КСК.

Карбонаты Са, находящиеся в составе РШ, форсированно диссоциируют по реакциям:

$$CaCO_3=CaO + CO_2\uparrow \quad (2.23)$$

Образующийся в результате диссоциации CaO резко увеличивает количество оксида Са в шлаке и, следовательно, скорость растворения извести согласно уравнению (2.22). Карбонат Са при диссоциации выделяют газ CO_2. В результате превращения каждый моль диссоциирующего $CaCO_3$ выделяет 22,4 л при нормальных условиях CO_2. Кроме того, образующийся CO_2 окисляет углерод, который присутствует в образующемся шлаке. Реакция окисления твердого углерода, присутствующего в шлаке, является эндотермической:

$$C_T + CO_{2(Г)}=2CO_{(Г)} \ (\Delta H°=172{,}1 \text{ кДж}). \quad (2.24)$$

В соответствии с принципом Ле Шателье с повышением температуры реакция смещается вправо. В результате превращения на каждый моль прореагировавшего диоксида углерода CO_2 (22,4 л при нормальных условиях) исчезает один моль твердого углерода (12 г, или в объемных единицах 0,0055 л) и появляется 2 моля CO (44,8 л). Таким образом, при рассмотрении гетерогенных процессов с участием газов, изменением объема конденсированной фазы (в данном случае твердого углерода) по сравнению с изменением объема газовой фазы можно пренебречь и считать, что изменение объема в таких реакциях определяется только разностью числа молей газообразных веществ в правой и левой частях уравнения химической реакции [219]. Константа равновесия реакции (2.25) записывается в виде:

$$K_p = \frac{p^2_{CO_2}}{p_{CO_2} a_C}, \quad (2.25)$$

где a_c — активность углерода;
p_{CO2} — парциальное давление CO_2, бар;
p_{CO} — парциальное давление CO, бар.

При давлениях и температурах, наблюдаемых в электропечи, активности чистых конденсированных фаз мало отличаются от единицы $a_c=1$, поэтому константа равновесия реакции (2.24) записывается в виде:

$$K_p = \frac{p^2_{CO_2}}{p_{CO_2}} \quad (2.26)$$

Численные значения константы равновесия можно найти из уравнения [219]:

$$\boldsymbol{K = -\frac{9001}{T} + 9,28}$$

Результаты расчетов равновесного состава газа при давлении, равном 1, атмосфера представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Равновесный состав газа при давлении, равном 1 атмосфере

t, °C	K	% CO при давлении 1 атмосфера
400	0,0001	0,89
600	0,0932	26,23
800	7,7870	89,67
1000	161,9201	99,39
1500	15848	99,99
1600	29512	99,9966

Как видно, в области высоких температур, близких к 1000 °C, при которых K>>1 равновесный газ содержит больше 99% CO. В этих условиях реакция практически необратима, то есть в области высоких температур, характерных для сталеплавильных агрегатов, в присутствии твердого углерода диоксид углерода неустойчив и практически полностью превращается в монооксид углерода. Таким образом, количество газов увеличивается вдвое. Они буквально смывают пленки и разрывают поры внутри кусков извести, что резко ускоряет диффузию ионов оксидов Mn и Fe в сердцевину куска извести и скорость растворения последней. Это значит, что еще до конца плавления шихты на ванне металла присутствует гомогенный жидкоподвижный шлак.

В результате разработанный на основе КСК с добавками глинозема и NaCl-KCl дисперсный РШ оказался весьма эффективным препаратом [239].

Установлены закономерности ускоренного шлакообразования с помощью РШ, которые заключаются в следующем:

1. При нагреве флюса РШ при температуре 680 °C начинают плавиться NaCl-KCl.

2. Расплав солей растворяют в себе Al_2O_3 и дисперсный $CaCO_3$. Образующийся жидкий шлак растекается по кускам извести, смачивает их и проникает в поры.

3. Температура в зоне шлакообразования постоянно растет и дисперсный $CaCO_3$ диссоциирует на CaO и CO_2. Выделяющийся CO_2 увеличивает поры и разрушает твердые пленки на поверхности кусков извести, чем облегчает задачу растворения в извести катионов железа и марганца, концентрация которых увеличивается в образующемся шлаке.

4. Ускоренно образующийся шлак, который легче металла, поднимается и заполняет прорезаемые электродами колодцы. Шлак экранирует дуги, в результате чего все тепло начинает расходоваться на расплавление металла, при этом резко снижается угар марганца и железа, уменьшается время плавления шихты, экономится электроэнергия.

Разработанная шлакообразующая смесь запатентована [240].

2.3. Обоснование преимуществ диффузионного раскисления стали дисперсными смесями в печах с основной футеровкой

Изучив технологию выплавки сталей для ответственного фасонного литья, установили, что восстановительный период является наиболее ответственным за качество стали. Чтобы добиться повышения качества выплавляемой стали в ДСП с основной футеровкой, разработали новую технологию диффузионного раскисления, позволяющую резко снизить время восстановительного периода при одновременном повышении результативности раскисления. **Для этого разработали и исследовали раскислительную смесь, которая обладает высокой реакционной способностью, способностью вспенивать и эффективно раскислять и десульфурировать шлак** [202].

Это стало возможным благодаря замене традиционных раскислительных смесей, описанных в главе 1, на дисперсную смесь порошков. В основу разработанной раскислительной смеси заложили подробно описанные ранее в настоящей главе хорошо зарекомендовавшие себя раскислители УСМ и КСМ. Для повышения результативности новой смеси в ее состав дополнительно вели алюмосодержащий материал (АСМ), который обладает большим сродством к кислороду и является более сильным раскислителем, чем C и Si. Кроме того, в смесь добавили также Na_2CO_3 и КСК. Материалу присвоена марка РДА — раскислитель диффузионный алюмосодержащий. Основное преимущество смеси состоит в дисперсности и большой суммарной удельной поверхности ее гранул [202], что резко повышает раскислительный потенциал РДА [210]. Определили средние размеры частиц РДА и частиц смеси, и заводской смеси АО «ОЗММ». Они равняются 20 и 150 мкм соответственно. Форму частиц условно принимали за идеальные сферы. Компонентный состав заводской смеси состоял из молотых коксика, ферросилиция ФС75 и алюминиевой крошки и был близок по составу к РДА. Поэтому условно приняли плотности, поверхностное натяжение и мольный объем смесей равными друг другу.

Рассчитали количество частиц, которое внесет при подаче на шлак 1 кг смесь РДА:

Объем одной частицы РДА равен

$$V_{\text{рда}} = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 = \frac{4}{3} \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}001^3 = 4{,}2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3. \qquad (2.27)$$

Общий объем раскислительной смеси массой 1000 г при насыпной плотности равной 0,8 г/см^3 составляет

$$V_o = \frac{m}{\rho} = \frac{1000}{0,8} = \ 1250 \text{ см}^3. \quad (2.28)$$

Тогда общее количество частиц, вносимых РДА, будет следующим (формула 2.39)

$$n = \frac{V_o}{V\text{рда}} = \frac{1250}{5,6 \cdot 10^9} = 2,99 \cdot 10^{11} \text{ шт.} \quad (2.29)$$

Принимаем количество шлака в печи во время восстановительного периода равным 8% от количества жидкого металла, то есть 8000·0,08=640 кг. При плотности жидкого основного шлака, равной 3000 кг/м^3, объем шлака в печи составит 640/3000=2,1·10^{5}см^3. Таким образом, при подаче на шлак только 1 кг смеси РДА на каждый кубический сантиметр шлака придется 2,99·10^{11}/2,1·10^5=1,4·10^6 частиц.

Для сравнения произвели аналогичные расчеты для раскислительной смеси, применяемой на заводе. Расчеты показали, что количество частиц, вносимых одним килограммом заводской смеси, составит 7,08·10^5 штук, что в 1,9·10^5 раза меньше, чем кусочков РДА. На каждый кубический сантиметр шлака придется 3,3·10^3 частиц заводской смеси против 1,4·10^6 частиц РДА.

Удельная площадь межфазной поверхности $S_{уд}$ РДА, вычисленная по формуле (2.27) [193], будет равняться 3000 см$^{-1}$, а $S_{уд}$ для заводской смеси равна 400 см$^{-1}$, то есть в 7,5 раз больше. Так как существенная часть свободной энергии системы сконцентрирована в междуфазных границах, реакционная способность раскислительной смеси РДА существенно превысит этот показатель у заводской смеси. С уменьшением радиуса частиц с 0,0075 см до 0,001 см реакционная способность, а значит, и интенсификация химических взаимодействий при применении РДА возрастет в $\frac{1}{0,001} / \frac{1}{0,0075} = 75 раз$.

После присадки РДА в печь карбонаты Ca, Sr и Na, находящиеся в составе РДА, при высоких температурах шлаков от 1500 до 1650 °С форсированно диссоциируют по реакциям:

$$MeCO_3 = MeO + CO_2\uparrow \quad (2.30)$$

За счет диссоциации карбонатов шлак немедленно вспенивается. Выделяющийся газ CO_2 способствует перемешиванию шлака и замешиванию в него компонентов смеси РДА. Образующиеся в результате диссоциации CaO, SrO и Na_2O увеличивают основность шлака и, следовательно, его способность десульфурировать металл. Na_2O еще и разжижает шлак и тем самым увеличивает его реакционный потенциал [223].

Оценим возможности РДА по вспениванию шлака. Для этого в условиях реального производства необходимо в первую очередь знать, какой объем выделяющихся газов необходимо обеспечить для получения требуемого толщины слоя вспененного шлака.

Рассчитаем количество CO, образующегося при присадке на шлак РДА. В первую очередь после подачи на шлак РДА при высокой температуре в печи будут диссоциировать карбонаты Ca, Sr и Na и выделять CO_2 который вспенивает шлак и активно перемешивает смесь по всему объему шлака. Примем количество карбонатов в смеси РДА равным 20%. Расчет будем вести условно на $CaCO_3$ находящегося в 1 кг смеси РДА. Тогда диссоциация 100 г $CaCO_3$ согласно реакции 2.30, вызовет образование 22,4 литра CO_2, а 200 грамм карбоната кальция, находящихся в смесевом раскислителе РДА образуют 44,8 литра газа. Образующийся CO_2 немедленно вступает в реакцию с УСМ, находящимся в смеси РДА. Из данных табл. 2.1 следует, что в области высоких температур более 1500 °C, при которых K>>1 равновесный газ содержит больше 99% CO. В этих условиях реакция практически необратима. Таким образом, в области высоких температур характерных для ДСП в присутствии твердого углерода, диоксид углерода практически полностью превращается в монооксид [219]. В результате превращения на каждый моль прореагировавшего диоксида углерода CO_2 (22,4л при нормальных условиях) исчезнет один моль твердого углерода (12 г, или в объемных единицах 0,0055л), и появятся 2 моля CO (44,8л). Таким образом, при рассмотрении гетерогенных процессов с участием газов, изменением объема твердой конденсированной фазы C по сравнению с изменением объема газовой фазы, можно пренебречь и считать, что изменение объема в этой реакции определяется только разностью числа молей газообразных веществ в правой и левой частях уравнения химической реакции. Таким образом, число молей CO по сравнению с CO_2 удвоится и будет равняться 89,6 литра. Это способствует вытеснению кислорода воздуха из зоны реакции и создает восстановительную атмосферу в печи, усиливающую раскисляющие возможности смеси.

Находящийся в смеси дисперсный УСМ участвует в реакциях восстановления FeO, MnO и других оксидов, углеродом по реакциям 2.31 и дополнительно вспенивает шлак.

$$(MeO) + (C)=[Me]\downarrow + \{CO\}\uparrow; \qquad (2.31)$$

УСМ в РДА находится примерно 400 г/кг. Согласно реакции (2.31), 12 г углерода, вступая в реакцию с FeO, образует 22,4 литра CO. Тогда 400 грамм УСМ образует (22,4·400)/12=746,7 литра.

Суммарно в результате реакций 2.24 и 2.31 образуется 836,3 литра CO. Согласно исследованиям [134], для обеспечения эффективного уровня вспенивания шлака необходимо обеспечить приведенную скорость выделения газов не менее 10 $м^3/(м^2с)$. В нашем случае при диаметре ванны печи 2230 мм скорость выделения газов будет равна 836,3/3,5=239 $м^3/(м^2с)$, что существенно

превышает необходимый минимум. Выделяющийся CO в результате этой реакций усиливает восстановительную атмосферу в печи и участвует во вспенивании шлака.

Процесс вспенивания шлака описывается индексом вспенивания Σ(с). Ключевыми факторами, оказывающими влияние на процесс вспенивания шлака, являются вязкость, поверхностное натяжение и плотность шлака. Наиболее точно спрогнозировать Σ(с) позволяют зависимости, вычисленные в работах [135, 136], так как, помимо μ, и σ они учитывают величину диаметра пузырька d.

$$\Sigma = 115\frac{\mu^{1,2}}{d^{0,9}\rho\sigma^{0,2}};\ \Sigma = 1\cdot 10^{9}\left(\frac{\mu E_{эф}}{(\rho g)^2 d}\right), \qquad (2.32)$$

где μ — вязкость шлака, Па·с;
d — диаметр пузырька, м;
ρ — плотность шлака, кг/м^2;
σ — поверхностное натяжение шлака, Н/м;
g — ускорение свободного падения, м/с^2;
Еф — эффективная эластичность шлака.

В этих формулах решающая роль принадлежит вязкости шлака и диаметру пузырьков. При подаче РДА на шлак в результате диссоциации карбоната натрия образующийся в результате реакции (2.30) оксид натрия разжижает шлак, что увеличивает способность шлака к вспениванию, но несколько уменьшает Σ(с). Решающую роль в его увеличении играет диаметр пузырьков. В нашем случае центрами газообразования являются огромное количество дисперсных частиц РДА, которые образуют множество дисперсных пузырьков CO, что резко увеличит Σ(с).

Таким образом, применение для диффузионного раскисления шлака РДА резко повысит показатели выплавки стали в ДСП в условиях реального производства за счет полного укрытия электрических дуг вспененным шлаком. Кроме того, когда дуги полностью погружены в шлак, значительно уменьшатся колебания силы тока и напряжения, что позволяет увеличить подводимую мощность и длину дуг. При увеличении длины дуг ток уменьшается [126]. В результате этого, а также меньшего бокового расхода при экранировании дуг шлаком снизится расход электродов. Косвенно о полном покрытии дуг можно судить по снижению шумового эффекта в печи. Дуги горят тихо, устойчиво и монотонно [133].

Таким образом, за счет принудительного вспенивания шлака и полной экранизации горящих дуг все их тепло расходуется на нагрев шлака и металла, что приводит к ускоренному росту температуры и создает благоприятный тепловой режим для активизации процесса десульфурации стали по реакции (2.33), кроме того, способствует сокращению времени плавки [210]:

$$(FeS) + (CaO)=(CaS) + (FeO), \quad (2.33)$$

а также восстановлению FeO, MnO и других оксидов из шлака Al и Si, находящихся в РДА по реакциям:

$$2(MeO) + (Si)=2[Me]\downarrow+ (SiO_2); \quad (2.34)$$

$$3(MeO) + 2(Al)=3[Me]\downarrow+ (Al_2O_3); \quad (2.35)$$

Образующийся в результате реакций (2.35) Al_2O_3 участвует в разжижении шлака и косвенно повышать его основность. Восстановленные в шлаке Fe и Mn согласно закону распределения диффундируют в металл, а FeO и MnO из жидкой стали переходят в шлак, где вступают в реакцию с дисперсными компонентами смеси и восстанавливаются. Согласно закону распределения, в шлак диффундируют также FeS и MnS. Таким образом, сталь оказывается с более низкими содержаниями оксидов и S. За счет уменьшения в стали неметаллических включений и оксидных плен повышаются жидкотекучесть расплава, механические свойства и служебные характеристики отливок.

Для непрерывного присутствия восстановительной атмосферы в плавильном агрегате и поддержания шлака во вспененном состоянии по правилу Ле Шателье источники CO_2 и CO в печи не должны иссякать [219]. Это дает возможность утверждать, что РДА, в состав которой введены карбонаты и УСМ, необходимо присаживать в печь дискретными частями после затухания реакций выделения CO_2 и CO от предыдущей присадки смеси необходимо подавать следующую порцию.

Результативность разработанной смеси подтверждена многими проведенными в работе исследованиями [200, 201, 202]. На способ раскисления стали с помощью разработанной смеси РДА подана заявка на изобретение [203].

2.4. Обоснование преимуществ диффузионного раскисления стали дисперсными смесями в печах с кислой футеровкой

Изучив преимущества и недостатки выплавки стали в печах с кислой футеровкой выявили, что наряду с экономичностью процесса есть существенный недостаток, который заключается в том, что механические свойства кислой стали в термически обработанном состоянии ниже, чем в основной. Надежный путь повышения механических свойств кислой стали — разработка и внедрение новой технологии выплавки, которая будет способна дополнительно очистить расплав от НВ и, как следствие, повысит механические свойства стали, служебные характеристики отливок и даст возможность расширить ассортимент ответственных литых заготовок из стали, выплавленной в печах с кислой футеровкой.

Разрабатываемая технология отличается тем, что после окислительного периода и перед доводкой расплава по химическому составу впервые дополнительно введен восстановительный период плавки, где используют две раскислительные порошковые смеси, причем сначала осуществляют присадку первой смеси и подготовку тем самым к рафинированию, а для проведения рафинировочного процесса для снижения температуры плавления шлака и придания ему жидкоподвижности на вспененный шлак подают вторую раскислительную порошковую смесь. Затем во время выпуска металла в ковш дополнительно проводят внепечную обработку расплава в ковш, для чего используют рафинирующую смесь.

Первая смесь разжижает шлак и готовит его к рафинированию второй смесью. Известно, что кислые шлаки по сравнению с основными обладают более высоким электрическим сопротивлением, что позволяет нагревать жидкую сталь более короткой дугой на высокой ступени напряжения печного трансформатора. Это улучшает передачу тепла металлу и увеличивает электрический КПД установки. Целесообразно при изготовлении первой смеси усилить эти преимущества кислых шлаков. Для этого их необходимо вспенивать, экранировать дуги и все тепло электрических дуг передавать шлаку и металлу, для чего требуется разработать состав смеси, который сможет принудительно вспенивать шлак. Поэтому в основу разрабатываемой смеси заложили модификатор КСК с размерами частиц 20 мкм. Для повышения разжижающего потенциала смеси в нее добавили рациональное количество углекислого натрия.

Высокие температуры в печи с кислой футеровкой >1600 °С способствуют интенсивной диссоциации $CaCO_3$, $SrCO_3$ Na_2CO_3, которые находятся в присаживаемой в печь на шлак первой смеси. При температуре шлака ≥1500 °С равновесный газ, состоящий из CO и CO_2, содержит >99% CO (табл. 2.1). Поэтому образующийся при диссоциации газ CO_2 неустойчив, и если в создаваемую смесь ввести твердый УСМ, то начнется реакция окисления твердого углерода за счет диоксида углерода $C_{(т)}+CO_{2(г)}=2CO_{(г)}$. Реакция Будуара является эндотермической (ΔH=172,1 кДж). Поскольку реакция эндотермическая, то, в соответствии с принципом Ле Шателье, с повышением температуры равновесие смещается вправо. В условиях кислой плавки реакция практически необратима, то есть в области высоких температур диоксид углерода практически полностью перейдет в монооксид углерода.

Рассчитаем количество углерода, требуемого для перевода диоксида углерода в монооксид углерода по реакции Будуара. При диссоциации 1000 граммов образуется 1000·22,4/100=224 литров CO_2. Для реакции с таким количеством CO_2 требуется ввести в смесь следующее количество УСМ. С мас.%=12·224/22,4·100=12. В результате превращения на каждый моль прореагировавшего диоксида углерода CO_2 (22,4 л при нормальных условиях) появятся 2 моля CO (44,8 л). Таким образом, CO будет в 2 раза больше, чем CO_2. Монооксид углерода вспенивает шлак и активно замешивает в него

присаживаемую смесь. Кроме того, он вытесняет из зоны реакции кислород воздуха, создает восстановительную атмосферу, что увеличивает усвояемость второй смеси.

Первой смеси присвоена марка РД19П. Содержание обозначения РД19П следующее: РД — раскислитель диффузионный; 19 — соотношение массовых частей УСМ и КСК материалов 1:9. Часть КСК заменена на Na_2CO_3.

Произвели расчеты по формулам (2.27–2.29). Количество частиц, которое внесет при подаче на шлак один килограмм смеси РД19П при насыпной плотности 1, 2 г/см^{3}равняется $1{,}9\cdot10^{11}$ штук. При подаче на шлак только одного килограмма смеси РД19П на каждый см^3 шлака придется $9{,}3\cdot10^5$ частиц.

Размер кусков извести, применяемой на заводе, равен от 1 до 30 мм. Средний размер кусков извести составит 15,5 мм. Тогда общее количество частиц, вносимых на шлак одним килограммом извести, равняется 427 штук. На каждый кубический сантиметр шлака придется $2\cdot10^{-3}$ частиц извести.

Удельная площадь межфазной поверхности смеси РД19П будет равняться 3000 см$^{-1}$, а удельная площадь межфазной поверхности заводской извести равна 3,8 см$^{-1}$, то есть в 789 раз меньше. С уменьшением размера частиц от 1,55 см до $1\cdot(10^{-3})$ см реакционная способность, а значит, и интенсификация химических взаимодействий возрастет в $\frac{1}{0{,}001} / \frac{1}{1{,}55} = 1550\,раз$.

В результате диссоциации карбонатов, кроме газа CO_2, образуются основные оксиды CaO, SrO, Na_2O и газ, которые снижают кислотность шлака, разжижают его, освобождают FeO и MnO от связей с кремнеземом в силикатных конгломератах. Жидкоподвижный шлак усиливает способность его составляющих компонентов вступать в реакции. FeO и MnO становятся активными, то есть способными восстанавливаться.

Присадка РД19П вызывает ускоренный рост температуры расплава по сравнению с рядовыми плавками [245] за счет вспенивания шлака. Так как кислые шлаки по сравнению с основными обладают более высоким электрическим сопротивлением, температура в кислых печах будет расти значительно быстрее, чем в основных. **В результате быстрого роста температуры обеспечиваются благоприятный тепловой режим для рафинирования шлака и металла. Для их интенсификации на вспененный шлак подается следующая раскислительная смесь.** Ей присвоена марка РД21П. Содержание обозначения РД21П следующее: РД раскислитель диффузионный; 21 — соотношение массовых частей УСМ и АСМ материалов 2:1. Она близка по составу к РДА, но усовершенствована к условиям кислого процесса. КСМ и Al_2O_3 исключены из состава смеси, так как SiO_2 продукт реакции КСМ с кислородом преобладает в шлаках кислой плавки, а Al_2O_3 образуется в процессе окисления АСМ. В смесь введены дополнительно оксиды Na и K для придания шлаку жидкоподвижности. РД21П следует присаживать порционно. После подачи смеси дисперсные Al и C начинают активное восстановление FeO и MnO, освобожденных от связей с

SiO_2 по реакциям 2.34, 2.35. Восстановленные Fe и Mn диффундируют в жидкую сталь, а FeO и MnO, находящиеся в расплаве, переходят в шлак, где вступают в реакции с Al и C и восстанавливаются. Таким образом, происходит рафинирование стали от оксидов, что способствует повышению ее жидкотекучести и механических свойств. Выделяющийся в результате реакции 2.24 газ CO продолжает вспенивать шлак и стимулировать рост температуры металла и шлака. Температура металла под вспененным шлаком неуклонно растет, причем растет значительно быстрее, чем в обычных плавках. Это способствует уменьшению времени плавки и экономии электроэнергии. По мере роста температуры металла и шлака начинают развиваться эндотермические реакции (1.8–1.10) восстановления Si из SiO_2, результат которых позволяет экономить ферросилиций.

Таким образом, теоретически показано, что введение в технологический процесс плавки в печи с кислой футеровкой восстановительного периода с применением специальных дисперсных раскислительных смесей, разжижающих и принудительно вспенивающих шлак, повышающих его реакционную способность существенно снизит содержание оксидов в стали и повысит механические свойства стали и ее жидкотекучесть.

Проведенные в работе исследования полностью подтвердили теоретические предпосылки [245]. Разработанный технологический процесс запатентован [246].

2.5. Обоснование рационального состава дисперсной рафинирующей смеси универсальной

С помощью анализа литературных источников установили, что для повышения механических свойств стали и служебных характеристик отливок ответственного назначения необходимо обеспечить максимальное рафинирование стали от неметаллических включений и дополнительную десульфурацию расплава. Для этого целесообразно применить внепечную обработку расплава твердыми шлаковыми смесями (ТШС). В связи с этим разработали и исследовали ТШС для рафинирования стали ковшевой обработкой, результативность которой повысили с помощью создания процесса флотационно-адсорбирующего рафинирования стали мелкодисперсными порошками. Ее назвали рафинирующая смесь универсальная (РСУ), так как она одинаково эффективна для внепечной обработки углеродистых, легированных сталей, выплавленных как в основных, так и в кислых печах. Указанный выше технический результат достигается тем, что в РСУ, для обеспечения максимальной основности и минимальной окисленности и ускорения времени плавления в качестве основного компонента применен дисперсный CaO, изготавливаемый по ГОСТ 9179 [249]. Это известь воздушная, кальциевая, негашеная, порошкообразная и без добавок 1-го сорта. Отличительной важной особенностью материала является отсутствие гидратации.

Для создания процесса флотационно-адсорбирующего рафинирования стали применили модификатор КСК — кальций-стронциевый карбонат. Для повышения результативности смеси, снижения ее температуры плавления и вязкости образующегося шлака к основному компоненту CaO и дисперсному КСК добавили флюорит CaF_2. В качестве флюорита выбрали флюоритовый концентрат флотационного обогащения марки ФФ-97А ГОСТ 29219 [250]. Он отличается высокой чистотой по примесям и дисперсностью. Добавили также карбонат натрия Na_2CO_3 высшего сорта дисперсного и с минимальными количеством примесей. ГОСТ 5100 [251].

Компоненты смеси перед использованием тщательно перемешиваются и фасуются в пакеты, масса которых зависит от металлоемкости ковша и требований заказчика.

Смесь присаживается на дно ковша или под струю металла на выпуске из плавильной печи в ковш совместно с алюминием для раскисления металла. Сталь выпускается совместно со шлаком. Расход алюминия составляет 1 кг/т.

Рассчитаем необходимое количество смеси. Результативность ассимиляции неметаллических включений рафинирующим шлаком в ковше определяется его химическим составом, консистенцией, толщиной жидкого слоя. Критерием оценки эффективности ассимилирующей способности шлака служит степень загрязненности литых заготовок неметаллическими включениями. Ассимилирующая способность шлака повышается с увеличением толщины его жидкого слоя, которая зависит от содержания в смеси флюсующих компонентов (щелочи, фтора, оксидов железа и марганца). Если жидкий слой меньше 6 мм, то способность шлака к ассимиляции глиноземистых и других включений заметно снижается [223].

Рассчитаем минимальное количество смеси, которое необходимо присадить для получения минимального слоя шлака толщиной 6 мм, по формуле:

$$M=3,14\pi r^2hp, \tag{2.36}$$

где r — радиус ковша, м;
h — толщина слоя шлака, м;
p — плотность металлургического шлака кг/м^3.

Тогда $M=3,14\cdot0,75^2\cdot0,006\cdot2800=30$ кг.

С учетом потерь на газообразование при диссоциации карбонатов расход примем ~ 40 кг или 5 кг/т жидкого расплава для восьмитонного ковша.

При присадке смеси РСУ запускается флотационно-адсорбционный принцип рафинирования расплава. $CaCO_3$ и Na_2CO_3 диссоциируют по реакциям:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2; \tag{2.37}$$
$$Na2CO_3 \rightarrow Na_2O + CO_2. \tag{2.38}$$

При этом создается поток рафинирующего газа и начинается флотация.

При температуре выпуска расплава равной 1600 °С равновесный газ, состоящий из CO и CO_2 содержит концентрацию CO приближающейся к 100% (табл. 2.1).

Рассчитаем количество углерода, требуемого для перевода диоксида углерода в монооксид углерода по реакции Будуара. При наличии в смеси 10% КСК при диссоциации образуется 500·22,4/100=112 литров CO_2. Для реакции с таким количеством CO_2 требуется С, находящийся в металле:

$$\% \ C = \frac{\mathbf{112 \cdot 12 \cdot 100}}{\mathbf{22,4 \cdot 1000 \cdot 1000}} = \mathbf{0,0006}$$

Как видно, реакция превращения CO_2 в CO с помощью твердого углерода металла не оказывает заметного влияния на химический состав стали. Вместе с тем количество газа после реакции возрастает в два раза, что обеспечивает восстановительную атмосферу в ковше.

Газ осуществляет очистку расплавов при реализации двух процессов [222].

Первый из них — удаление водорода, диффундировавшего в пузырек CO.

Процесс удаления водорода из расплава за счет проникновения атомов водорода в газовый пузырек состоит из нескольких стадий:

1) перемещение атомов водорода в жидком металле к границе раздела металл-газ;

2) переход атомов водорода через границу раздела;

3) образование молекул водорода вблизи границы раздела;

4) переход молекул водорода в газовую фазу.

В дальнейшем газовый пузырек выходит из расплава вместе с растворенным в нем водородом. Процесс перехода водорода из расплава в пузырьки газа можно описать обычным уравнением массопереноса [222]:

$$dn=\beta F(c-c_p)d\tau, \qquad (2.39)$$

где dn — количество водорода, перешедшего из расплава в пузырек газа;

τ — время, с;

β — коэффициент массопереноса, учитывающий скорость как диффузионного, так и кинетического звеньев процесса в обеих фазах;

c, c_p — концентрации водорода в момент времени τ в расплаве и на границе газ-металл соответственно, ppm;

F — поверхность контакта газ-металл, $м^2$.

Из уравнения (2.30) следует, что результативность дегазации повышается при увеличении поверхности контакта пузырьков с металлом, чему способствует дисперсность смеси и интенсивный барботаж расплава.

Второй процесс очистки расплава заключается в удалении НВ за счет флотирующего воздействия на них пузырьков газа. На поверхности пузырьков измельченной газовой фазы адсорбируются неметаллические включения с последующей коагуляцией и образованием агломератов, выносимых на поверхность расплава и образующих шлак. Флотационное рафинирование хорошо зарекомендовало себя при очистке алюминиевых сплавов, чугунов и сталей и подтверждено моделированием процесса флотации [218].

Рациональная присадка РСУ в ковш соответствует расчетной и составляет 5 кг/т расплава. Количество частиц, вносимых 5 кг РСУ, вычисленных по формулам (2.27–2.29) будет равняться $9{,}95 \cdot 10^{11}$штук. На один кубический сантиметр расплава придется $7{,}76 \cdot 10^{4}$ штук газообразующих частиц. Удельная поверхность частиц составит 3000 $см^{-1}$.

Таким образом, за счет дисперсности смеси ее флотирующая способность резко увеличивается. Кроме того, этому способствует барботаж расплава при сливе металла в ковш, что увеличивает равномернее распределение пузырьков в объеме жидкого металла.

После диссоциации карбонатов образуется в дополнение к основной шлакообразующей части смеси дисперсный CaO, увеличивающий основность шлака. Образующийся Na_2O в рациональных количествах снижает температуру плавления CaO до температуры 1100 °С, а находящийся в смеси фторид максимально снижает вязкость образующегося шлака [223]. Начинается адсорбционный период. Образующиеся капли шлака высокоосновные, практически с нулевой окисленностью, коагулируя, легко адсорбируют сульфиды, а также оксиды, такие как FeO, MnO и образующиеся в результате раскисления стали алюминием Al_2O_3. Очень важно, что такая смесь способна адсорбировать оксид алюминия и растворять его [223, 206], так как при выпуске стали производят окончательное раскисление алюминием в ковше. При этом образуется Al_2O_3, который, адсорбируясь шлаком, разжижает его. Эти выводы согласуются с данными работ [206, 223–225], где показано положительное влияние Na_2O, CaF_2 и Al_2O_3 на рафинирующую способность смесей.

Очень важно для созданной смеси рассчитать коэффициент распределения серы между металлом и создающимся шлаком. Коэффициент распределения серы между шлаком и металлом определяется по формуле 2.40 [252]:

$$\boldsymbol{L_S} = \frac{(\boldsymbol{S}_{\text{шл}})}{\boldsymbol{S}_{\text{мет}}} \tag{2.40}$$

Процесс десульфурации описывается уравнением реакции:

$$[\text{S}] + (\text{CaO}) = (\text{CaS}) + [\text{O}] \tag{2.41}$$

Константа равновесия данной реакции равна:

$$\boldsymbol{k_p = \frac{a_{CaS} \cdot a_O}{a_{CaO} \cdot a_S}}, \tag{2.52}$$

где а — активности элементов.

Выражение можно записать:

$$[\boldsymbol{S}] = \frac{a_{CaS} \cdot a_O}{a_{CaO} k_p f_s} = \frac{X_{CaS} \cdot \gamma_{CaS} \cdot [O] \cdot f_O}{a_{CaO} \cdot \gamma_{CaO} \cdot k_p \cdot f_O}, \tag{2.43}$$

где $[\boldsymbol{S}]$ — концентрация серы в металле;
[O] — концентрация кислорода в металле
k_p — константа равновесия;
f_S, f_O — активности серы и кислорода в металле;
X_{CaS} — мольная доля сульфида кальция в шлаке;
γFeO, γMnO — соответствующие коэффициенты активности в конечном шлаке.

Выразим значение $\boldsymbol{X_{CaS}}$ — мольную долю сульфида кальция в шлаке через концентрацию серы, тогда

$$\boldsymbol{X_{CaS} = \frac{\left(\frac{\%S}{32}\right)}{\Sigma n}}, \tag{2.44}$$

где $\boldsymbol{\Sigma n}$ сумма молей компонентов шлака — CaO, CaS, SiO_2, AL_2O_3 и других в 100 г шлака.

Подставляя выражение (2.44) в уравнение (2.43), получим:

$$\boldsymbol{L_S = 32 k_p \frac{X_{CaO} \lambda_{CaO}^{\Sigma n}}{\gamma_{CaS}} \cdot \frac{f_S}{[O] f_O}} \tag{2.45}$$

В результате логарифмирования уравнения (2.45) получаем:

$$\lg LS = \boldsymbol{lg 32 + lg \frac{X_{CaS} \gamma_{CaO}^{\Sigma n}}{\lambda_{CaS}} + lg \frac{f_S}{a_O}} \tag{2.46}$$

В уравнении (2.56) первое слагаемое является величиной постоянной при постоянной температуре, второе слагаемое зависит от основности шлака, а третье определяется активностью кислорода и коэффициентом активности S в расплаве.

В работе [253] проводили эксперименты по изучению распределения серы между жидкой сталью и шлаками системы CaO-MgO-SiO_2-Al_2O_3 и получили эмпирическое уравнение для коэффициента распределения серы L_S, имеющее ту же структуру, что и уравнение (2.46).

$$\mathbf{Lg}L_S = -\frac{8760}{T} + 1{,}95 + 0{,}86 \cdot \frac{(CaO\%)+0{,}05(MgO\%)}{(SiO_2\%)+0{,}6(Al_2O_3\%)} - Lga_O + lgf_S \quad (2.47)$$

где (CaO), ($A1_2O_3$), (SiO_2), (MgO) — содержание оксидов в рафинировочном шлаке %;

fs — коэффициент активности серы, растворенной в металле;

a_0 — активность кислорода, растворенного в металле %;

T — температура металла, К.

Многие ученые применяют эту формулу [252, 254].

Рассчитаем и сравним L_S РСУ с L_S шлака перед выпуском. При выплавке стали 20ГЛ для ответственных железнодорожных отливок высокоосновный шлак после диффузионного раскисления РДА выпускают в ковш вместе с металлом, где за счет перемешивания и увеличения поверхности раздела между шлаком и металлом он продолжает десульфурацию стали. Температура металла на выпуске стали равна 1600 °С. В ковш дают и РСУ, одна из задач которого — десульфурация металла. Усредненный состав шлака перед выпуском приведен в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Шлак перед выпуском

Способ раскисления	Компонентный состав шлаков, %							Концентрация серы в расплаве, %
	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	Осн.	
Диффузионное раскисление 24 кг РДА	0,4	26,3	2,3	55,5	6,3	1,1	2,09	0,011

При рафинировании простых, углеродистых сталей можно принять значение f_S=1 (lgfs=lgl=0) и уравнение (2.47) запишется в виде:

$$\mathbf{Lg}L_S = -\frac{8760}{T} + 1{,}95 + 0{,}86 \cdot \frac{(CaO\%)+0{,}05(MgO\%)}{(SiO_2\%)+0{,}6(Al_2O_3\%)} - Lga_O. \quad (2.48)$$

Когда используют для раскисления стали марганец, кремний и алюминий, значение a_0 определяется содержанием алюминия, как наиболее сильного элемента раскислителя.

Значение a_0, равновесное с алюминием, определяется по формуле [254]:

$$К_{Al}^{факт} = [Al]^2 \cdot [O]^3, \quad (2.49)$$

где [A1], [O] — содержание алюминия и кислорода в металле, %.

При этом активность кислорода составляет:

$$a_0=[O]-\sqrt[3]{\frac{К_{Al}^{факт}}{[Al]^2}}. \quad (2.50)$$

Для ковша с основной футеровкой $К_{Al}^{факт}=10^{-14}$ [254]:
из выражения $К_{Al}^{факт} = [Al]^2 \cdot [O]^3$
при [Al]=0,03%, найдем степень раскисления металла a_0:

$$a_0=[O]-\sqrt[3]{\frac{К_{Al}^{факт}}{[Al]^2}}=a_0=\sqrt[3]{\frac{10^{-14}}{[0,03]^2}}=2,23\cdot10^{-4};$$

$$\lg a_0=-3,65.$$

Тогда L_S перед выпуском будет равно

$$\mathbf{L}gL_S = -\frac{8760}{1873}+1,95+0,86\cdot\frac{(55,5)+0,05(6,3)}{(26,3)+0,6(2,3)}-(-3,65);$$

$$L_S=210.$$

Рассчитаем L_S для РСУ.

Шлак РСУ. 90% $CaCO_3$, после диссоциации остается примерно 80% CaO. Остальные компоненты в шлаке Na_2O и CaF_2 в расчет не берем.

$$\mathbf{L}gL_S = -\frac{8760}{1873}+1,95+0,86\cdot80-(-3,65);\ L_S=10^{68}.$$

Как видно, L_S для РСУ существенно превосходит L_S предвыпускного шлака.

Вместе с тем на практике эта величина недостижима, так как при обработке стали ТШС одновременно проходит процесс разбавления рафинировочного шлака продуктами раскисления и печным шлаком, что приводит к резкому снижению L_S, так как расход ТШС значительно меньше, чем шлака в печи. Следует отметить еще один момент. Эффективность десульфурации стали ТШС уменьшается с понижением исходного содержания серы в металле, так при [S]нач=0,030%, L_S=40%; при [S]нач=0,020%, L_S=35%; и при [S]нач=0,010%, L_S=10%.

Таким образом, обработка РСУ в основных печах при концентрации серы в шлаке перед выпуском равной ~0,01% будет менее эффективна для десульфурации. Здесь основной эффект принесет флотация. **А вот в кислых печах, где не проводится десульфурация, внепечная обработка РСУ внесет существенный вклад в десульфурацию расплава.**

Результативность рафинирующей смеси РСУ подтверждена многими исследованиями [200, 239, 245]. Рафинирующая смесь запатентована.

2.6. Анализ воздействий C и Si на структуры жидкого чугуна и разработка дисперсного модификатора для высоких марок чугуна

Изучив состояние вопроса, пришли к выводу, что структура отливок из серого чугуна формируется в неравновесных условиях и зависит от большого числа факторов. В число факторов входит и модифицирование. Оно обеспечивает получение заданной структуры и улучшает служебные свойства. Главная же задача модифицирования при получении отливок из СЧ высоких марок заключается в предупреждении отбела и плохой обрабатываемости. В качестве основы при разработке смесевого модификатора, устраняющего отбел в технологическом процессе производства отливок из серого чугуна высоких марок, необходимо использовать компоненты, при добавке которых в жидкий чугун кристаллизация графитной фазы будет опережать формирование аустенитной структуры, [226, 263]. Применили дисперсные порошки УСМ и КСМ со средними размерами частиц КСМ=17,12 мкм, а УСМ=13,21 мкм. При модифицировании чугуна 0,1% каждого из порошков от массы жидкого в расплав будет внесено $13 \cdot 10^6$ шт/см^3 частиц УСМ, а частиц КСМ $4{,}19 \cdot 10^6$ шт/см^3, что обуславливает их результативность по сравнению с дроблеными модификаторами.

При модифицировании каждый кусочек УСМ и КСМ создает с расплавом локальную двухкомпонентную гетерогенную систему. Активное перемешивание расплава способствует равномерному распределению частиц в расплаве. В перегретом расплаве система Fe–C переходит в неравновесное состояние по всем параметрам, но наибольшее влияние оказывает изменение давления пара углерода [228]. Как известно, всякая система стремится к равновесному состоянию, а для этого при температуре модифицирования, равной 1400–1420 °C, необходимо снижать свободную энергию расплава. Этому способствует уменьшение размеров кусочков модификатора C и Si [227]. Высокое давление пара углерода будет также стремиться уменьшить размер фазы углеродных частиц [228].

Поверхность раздела фаз жидкого чугуна и частиц модификаторов существенно искривлена. Со стороны выпуклой поверхности раздела фаз появляется избыток давления, которое описывается уравнением Лапласа [229]:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \sigma \frac{dS}{dV} \qquad (2.51)$$

Параметр $\frac{dS}{dV}$ в этом уравнении характеризует кривизну поверхности. Поверхность имеет положительную кривизну ($\frac{dS}{dV}>0$), если она выпукла (центр кривизны находится под поверхностью), и отрицательную кривизну ($\frac{dS}{dV}<0$), если она вогнута (центр кривизны расположен над поверхностью). Если искривленная поверхность имеет сферическую форму, то параметр dS/dV для такой поверхности принимает значение 2/r, где r — радиус кривизны

поверхности. Уравнение Лапласа для такой поверхности имеет следующий вид:

$$\Delta p = \pm 2\frac{\sigma}{r} \qquad (2.52)$$

где знак «+» записан для выпуклой, а знак «–» — для вогнутой поверхности.

Как видно из формулы Лапласа, влияние кривизны поверхности на избыточное давление тем больше, чем сильнее поверхностное натяжение на границе раздела фаз. Избыточное давление способствует выталкиванию в расплав от поверхности зерен модификатора атомов, а также тонких пленочных образований атомов. Их толщина не может превышать радиус эквимолекулярной разделяющей поверхности.

Существенное влияние на растворимость частиц оказывает их дисперсность [229]. Изменение энергии Гиббса, выраженной через растворимость вещества в разном дисперсном состоянии, выражается формулой.

$$ln\left(\frac{C_Д}{C_S}\right) = \pm\frac{2\sigma V \cdot V_{мол}}{RTr}, \qquad (2.53)$$

где $C_Д$ и C_S — растворимость вещества в высокодисперсном состоянии и растворимость при равновесии с крупными частицами этого вещества;
$V_{мол}$ — мольный объем растворяемого вещества.

Уравнение 2.35 показывает, что с увеличением дисперсности растворимость материала растет, или химический потенциал частиц дисперсной системы больше, чем у крупной частицы, на величину $2\sigma V_{мол}/r$. В то же время растворимость зависит от знака кривизны поверхности, а это значит, что если частицы твердого вещества имеют неправильную форму с положительной и отрицательной кривизной и находятся в насыщенном растворе, то участки с положительной кривизной будут растворяться, а с отрицательной кривизной — наращиваться. В результате частицы С и Si, отдавая в расплав свои флуктуации, с течением времени растворения будут приобретать форму, отвечающую равновесному состоянию с минимальным межфазным поверхностным натяжением. С уменьшение температуры чугуна процесс растворения гранул модификатора будет замедляться. В результате, в расплаве остаются наночастицы графита и кремния в количествах $13\cdot10^6$ и $4{,}19\cdot10^6$ шт/см^3 соответственно. Причем кристаллическая решетка частиц графита максимально тождественна решетке графита, выделяющегося при кристаллизации чугуна. Кроме того, в результате растворения гранул модификатора расплав насыщается большим количеством флуктуаций кремния и графита.

Различия в свойствах атомов С и Si проявляются в течение всего времени модифицирования. В растворах Fe–C кремний оказывает существенное влияние на формирование графита. Если расплав Fe–C–Si

предварительно был модифицирован кремнийсодержащим материалом, то в нем, вплоть до момента затвердевания, сохраняются остатки кремнийсодержащих пленок, а окружающий их расплав обогащен кремнием. Кремний по своему электронному строению является аналогом углерода, но образует с железом более сильные химические связи. Влияние кремния проявляется в том, что он замещает углерод в связях Fe–C. Вытесненные частицы углерода располагаются вдоль и вокруг остатков кремнийсодержащих пленок, где увеличивается их концентрация. Это повышает устойчивость δ-железа с решеткой ОЦК.

Таким образом, перед заливкой чугуна в форму открытая неравновесная система Fe–C–Si насыщена большим количеством флуктуаций кремния и графита. Флуктуации углерода можно рассматривать как нижние примитивные иерархические структуры. И. Пригожин и многие другие авторы [230–234] показали, что открытая неравновесная система способна самоподобно размножаться на различных пространственно-временных условиях и сохранять память о прошедших структурных изменениях. Самоорганизация тесно связана с информационными источниками фазовых переходов, которыми служат флуктуации. Структурные изменения в системе происходят в точке бифуркации. Какую ветвь для самоорганизации выберет система, решают флуктуации [228].

Из разливочного ковша чугун заливается в литейную форму. Это способствует уменьшению температуры расплава и изменению свободной энергии находящихся в нем частиц. Они накапливают избыточную свободную энергию и повышают свою активность. Избыточная свободная энергия способствует самоорганизации перестройки межатомных конфигураций частиц расплава перед переходом из жидкой фазы в кристаллическую [226]. Точка бифуркации совпадает с началом кристаллизации чугуна. Согласно диаграмме состояния Fe–C, в первую очередь должен кристаллизоваться аустенит γ-железа с решеткой ГЦК [228]. Однако в модифицированном КСМ расплаве остатки кремнийсодержащих пленок и окружающий их расплав, обогащенный кремнием, блокируют диффузию углерода к атомам δ-железа, поэтому начинается опережающая кристаллизация графита за счет флуктуаций углерода, заполняющих кристаллизационное пространство. В сплаве Fe–C увеличение доли углерода усиливает связи C–C, что ведет к образованию группировок-кластеров из частиц C–C. Благодаря способности углерода создавать цепочки C–C–C– и кольца, кластеры имеют стремящуюся самоорганизоваться структуру. Структурная самоорганизация возникает при диссипативном состоянии физико-химической системы, обменивающейся энергией с окружающей средой. Механизм образования структуры пластинчатого графита — это самосборка структурных примитивов в верхние иерархические уровни. Примитивы самосборкой резко уменьшают удельную функцию Гиббса, которая по аналогии с эволюционными процессами в биологических системах для структур и тканей организма стремится к минимуму [227].

$$\overline{\widetilde{G_{\text{í}}^{\text{ím}}}} = \frac{1}{V}\int_0^V \frac{\overline{\partial \widetilde{G^{\text{ím}}}}}{\partial m_{MO}}(x,y,z)dxdydz \rightarrow \min, \qquad (2.54)$$

где $\overline{\widetilde{G_{\text{í}}^{\text{ím}}}}$ — удельная энергия Гиббса;
V — объем системы;
m_{MO} — масса выбранных микрообъемов;
x, y, z — координаты;
«–» означает, что $\overline{\widetilde{G_{\text{í}}^{\text{ím}}}}$ является удельной величиной (относится к микрообъему); «–» подчеркивает гетерогенный характер биологической системы;
ím — произвольное образование.

Нижний индекс í относится к структурам, состав которых постоянно меняется по времени.

Вывод заключается в следующем: при образовании наиболее термодинамически стабильных структур высших уровней природа использует доступные и менее термодинамически стабильные нижние уровни, включая длительность их существования. При этом действует закон временных иерархий, по которому средние длительности процессов и средние времена существования структур живой ткани возрастают от нижних уровней к высшим. Минимизируя функционал, примитивы самосборкой вызывают эволюционные изменения в структуре системы. При самопроизвольном самоподобном повторении структур соседних иерархических уровней работает функция самоподобия:

$$F=\lambda_i/\lambda_{i+1}, \qquad (2.55)$$

где F — функция самоподобия;
λ_i и λ_{i+1} — предыдущие и последующие уровни примитивов в самоуправляемой системе [227].

Таким образом, флуктуации, представляющие собой остатки растворенных частиц углерода, самосборкой возвращаются в исходное перед растворением состояние структуры графита за счет протекания ряда последовательных бифуркаций. Не исключается вариант самоорганизации структуры графита за счет распада флуктуаций по механизму спинодального их расслоения [235].

В это же время пленки кремния продолжают растворяться в чугуне. Кроме того, при понижении температуры становится термодинамически выгодно образование карбида кремния SiC. Образующийся SiC имеют гексогональную сингонию и форму [15], поэтому это идеальные подложки для графитной фазы в чугуне, имеющей аналогичную решетку, что будет дополнительно способствовать зарождению графитной фазы. В конечном итоге появляется доступ углерода к δ-железу и образуется аустенит. Кристаллизация в дальнейшем идет без образования отбела. Для

доказательства теоретических предпосылок провели эксперименты по закалке в воде модифицированного чугуна в жидком состоянии.

Методика проведения эксперимента. Выплавка исходного перед модифицированием чугуна осуществлялась в кислой индукционной печи ИСТ-006. Плавили чугун марки СЧ30. Химический состав был следующий: C — 3,01%; Si — 1,79%; Mn — 0,64%; Cr — 0,11%; S — 0,021%; P — 0,07%. Металл перегревали в печи до температуры 1400–1420º С. Разливали чугун из ковша вместимостью 40 кг. Сравнивали качественные показатели не модифицированного чугуна с модифицированным. Модифицирование производилось смесевым модификатором, в состав которого входили дисперсные УСМ и КСМ (60 и 40% соответственно) в количестве 0,3%. Модификатор заворачивали в фольгу и присаживали под струю расплава при заполнении ковша металлом на 1/3. Заливались специально разработанные технологические клинообразные пробы для изучения закаленного в жидком состоянии чугуна, эскиз которых изображен на рис. 2.6.

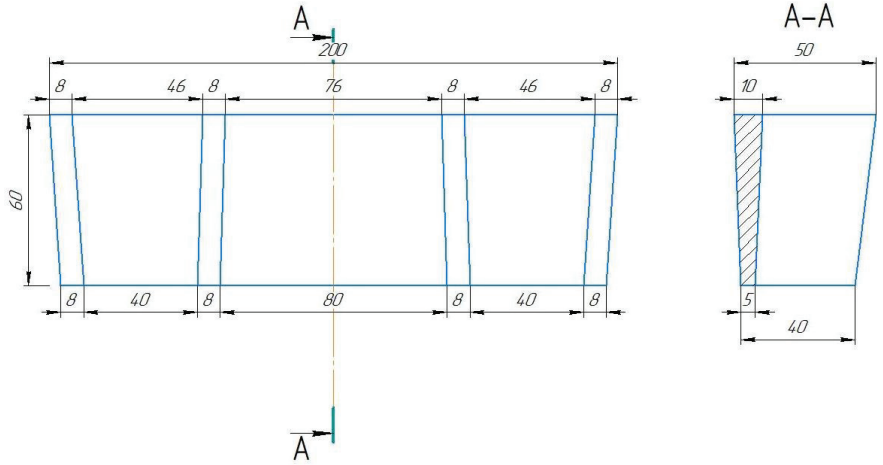


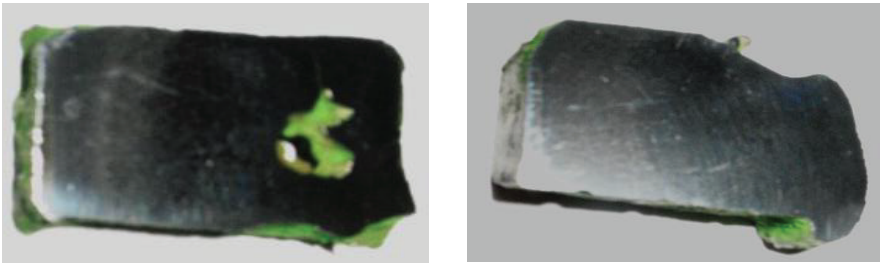
Рисунок 2.6. Эскиз технологической пробы
для закалки чугуна в жидком состоянии

Образец в тонком сечении по размерам близок к традиционной пробе, которая используется в литейных цехах для определения склонности чугуна к отбелу. Утолщенные части пробы предназначены для сохранения в них чугуна в жидком состоянии вплоть до закалки.

Пробы заливались в стержневую форму при температуре 1420 °С и подвергалась закалке в воде, когда утолщенная часть технологической пробы оставалась еще жидкой. Для получения сопоставимых результатов перед каждой закалкой образцов меняли воду. После закалки образцы разламывались в тонком сечении. Макроструктура излома свидетельствовала

о склонности чугуна к отбелу. Утолщенная часть пробы разрезалась посередине толстого сечения. Из нее изготавливали микрошлифы.

Отмечено, что уже косвенные признаки подтвердили результативность модифицирования. Излом не модифицированной клиновой пробы в тонком сечении показал, что макроструктура чугуна в пробе на 100% состояла из игольчатого цементита и была ярко-белого цвета. Кроме того, немодифицированная проба закристаллизовалась с усадочной раковиной в толстом сечении (рис. 2.7а).



а б

Рисунок 2.7. Образцы в толстом сечении: а — чугун с усадочной раковиной немодифицированный; б — чугун после модифицирования

Величина отбела на модифицированной клиновой пробе составила 10 мм. Остальная часть клина имела мелкозернистую макроструктуру серого чугуна, что свидетельствовало об удовлетворительном качестве графитизирующего модифицирования. Кроме того, модифицированный образец в толстом сечении закристаллизовался без усадки (рис. 2.7б).

Таким образом, немодифицированная клиновидная проба кристаллизовалась, как белый чугун, и обладала высокой предрасположенностью к усадке. Это подтверждает и микроструктура образца (рис. 2.8).

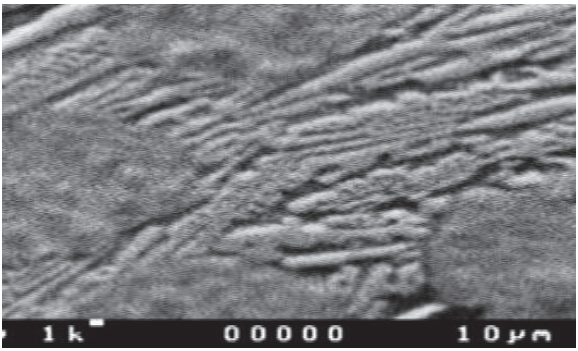


Рисунок 2.8. Микроструктура белого чугуна

В модифицированном образце перед закалкой активно шла графитизация, подавившая усадку.

Для детального изучения микроструктуры модифицированного закаленного чугуна и химического состава фаз использовали рентгеноспектральный анализатор Camebax SX-50. Анализировался чугун, который перед закалкой, был в жидком состоянии [226].

Результат закалки модифицированного образца представлен микроструктурой на рис. 2.9, а соответствующие результаты рентгеноспектрального анализа в табл. 2.3. Нумерация на рис. 2.9 тождественна номеру фазы в табл. 2.3.

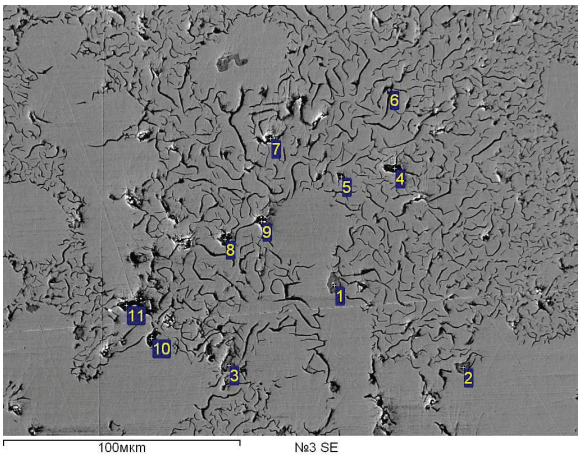


Рисунок 2.9. Результаты анализа

Таблица 2.3

Химический состав фаз

№ фазы	Концентрации элементов, % массе							Сумма
	C	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	
1	2,94	0	0	37,83	0	56,22	3,01	100
2	3,05	0	0	37,8	0	56,01	3,14	100
3	3,56	0	0	37,26	0	55,89	3,29	100
4	84,47	0,57	0	0,19	1,1	0,18	13,49	100
5	49,88	0,84	0	22	0,49	0,22	48,35	100
6	85,01	0,32	0	0,26	0,13	0,21	14,07	100
7	17,51	60,52	0	0,24	0,82	0	20,91	100
8	18,67	65,3	0	0,41	0,13	1,83	13,66	100
9	86,17	0,67	0	0,53	1,54	0,33	10,76	100
10	53,01	0,36	0	0,09	33,05	0	13,49	100
11	57,98	0,46	0	0,31	0,51	0,49	40,24	100

Характер кристаллизации показывает, что графитные включения образовали в жидкости пространственно-структурную графитную паутину. Закаленная обедненная углеродом жидкость превратилась в аустенитно-цементитную эвтектику. Графит и другие включения, были подвергнуты рентгеноспектральному анализу.

Включения под номерами 1–3 — это сульфиды марганца (о чем свидетельствует стехиометрия). Включение 10 приближается к сложному карбиду $(Cr, Fe)_7C_3$. Вместе с тем во включениях 1–3 и 10 присутствуют Fe и C. Fe является основой чугуна, поэтому его присутствие легко объяснимо. Присутствующий во включениях С подтверждает возможность адсорбции на поверхности сульфидов марганца и сложных карбидов пленок углерода. Номерами 4, 5, 6, 9, 11 отмечены включения графита. В частицах 4, 6, 9 доминирует углерод, и он может быть отнесен к не до конца растворившимся частицам УСМ модификатора. Фаза 11 похожа на графитную спель [228]. Включения 7 и 8 представляют остатки частиц КСМ модификатора. Вокруг них существует ферритная оторочка. Для углерода можно говорить о частичном, а для кремния — о практически полном усвоении модификатора.

В качестве заключения отметим следующее. Модифицированный смесью порошков С и Si серый чугун сохранил анормальный характер кристаллизации в виде опережающего выделения графитной фазы по отношению к аустенитной. Кристаллический углерод образует первым структурный каркас в метастабильном жидком растворе чугуна [226].

Уменьшение температуры расплава приводит к увеличению свободной энергии и ведет к охрупчиванию связей и распаду графитного каркаса на части. Общая высокая подвижность атомов углерода позволяет агрегатам углеродного каркаса преобразовываться в розеточный графит. Образование розеточного графита приводит в значительной мере к понижению свободной энергии в межфазном слое графитного каркаса и происходит в точке очередной бифуркации.

Таким образом, теоретически обосновано и практически подтверждены преимущества смесевого дисперсного модификатора на основе С–Si, обеспечивающего опережающее выделение графитной фазы по отношению к аустенитной в условиях естественного режима охлаждения, созданного литейной песчаной формой и кристаллизацию чугуна без отбела. Внедрение смесевого дисперсного модификатора из дисперсных УСМ и КСМ в производство позволило полностью исключить появление цементита в отливках «клин фрикционный», обеспечить требуемый уровень механических свойств [236].

На основе выбранных основных компонентов для производства смесевых реагентов и теоретических предпосылок их результативности разработаны новые материалы: флюс разжижитель шлака — РШ; раскислители диффузионные марок РДА, РД19П, РД21П; рафинирующая смесь универсальная РСУ, модификаторы комплексные. На все созданные материалы разработаны технические условия: ТУ 24.10.12-002-52044633-2025. Модификатор КСК-и

рафинирующие смеси на его основе для литейного и металлургического производства. ТУ 24.10.12-007-52044633-2016. Раскислительные и рафинирующие смеси для литейного и металлургического производства. ТУ 24.10.12-001-52044633-2025. Модификаторы комплексные, науглероживатели, раскислительные смеси для литейного и металлургического производства. Технические условия зарегистрированы в Центре стандартизации и метрологии. Все разработанные материалы размещены в банке данных «Продукция России», который создал и ведет ФГУП «Стандартинформ». Материалы и разработанные способы их применения запатентованы.

Результативность разработанных материалов и теоретических предпосылок подтверждены нижеприведенными исследованиями.

Выводы по главе 2

1. В качестве основных компонентов для изготовления смесевых модификаторов и раскислительных смесей выбраны УСМ и КСМ. Первый способен вспенивать шлак при выплавке стали. Кроме того, у дисперсного графита, подвергнутого специальной обработке, кристаллическая решетка максимально приближается к решетке графита в чугуне. КСМ входит в состав практически всех традиционных модификаторов и раскислителей. Высоко активный дисперсный порошок КСМ идеально подходит для обработки чугуна в составе смесевого модификатора.

2. Средний размер частиц порошка графита, подвергнутого специальной подготовке, составил 13,21 мкм, а кремния, полученного физико-химическим путем — 17,12 мкм, то есть при введении в расплав 0,1% порошков от массы жидкого в чугун будет внесено 10^6 шт/см^3 частиц УСМ и $4{,}41 \cdot 10^6$ КСМ, что обуславливает их высокую результативность по сравнению со стандартными модификаторами. Смесь этих двух мелкодисперсных порошков обеспечит все требуемые параметры модифицирования.

3. Разработан и теоретически обоснован механизм, обеспечивающий раннее наведение шлака при плавке в электродуговой печи с помощью подачи в завалку разработанного дисперсного смесевого флюса разжижителя шлака. При выплавке стали 110Г13Л методом переплава время плавления шихты с ранним наведением шлака уменьшили на 10 минут. Уменьшили угар марганца на 4,3%. Количество MnO и FeO в шлаке уменьшили на 18 и 16,5% соответственно, что облегчило задачу снижения этих оксидов в шлаке в восстановительный период плавки.

4. Теоретически обоснована высокая результативность разработанной дисперсной раскислительной смеси для диффузионного раскисления сталей в основных дуговых печах. При подаче на шлак одного кг смеси РДА на каждый кубический сантиметр шлака приходится $1{,}05 \cdot 10^6$ частиц, что в $8{,}2 \cdot 10^5$ больше, чем частиц заводской смеси. $S_{уд}$ смеси РДА будет равняться 1500 см$^{-1}$, а $S_{уд}$ заводской смеси равна 1,4 см$^{-1}$, то есть в 1071 раз меньше. Реакционная способность смеси РДА, а значит, и интенсификация химических

взаимодействий возрастет в 69 раз. Способность смеси вспенивать шлак создает благоприятный тепловой режим для активизации процесса десульфурации стали.

5. Теоретически обоснована целесообразность введения в технологический процесс кислой плавки диффузионного раскисления разработанными дисперсными смесями. При подаче на шлак 1 кг смеси РД19П на каждый кубический сантиметр шлака придется $1{,}5 \cdot 10^{9}$ частиц, а извести, применяемой на заводе, — $1{,}65 \cdot 10^{-4}$ частиц. $S_{уд}$ смеси РД19П в 1500 раз выше. Реакционная способность смеси РД19П выше в 1515 раз.

6. Теоретически обоснован рациональный состав разработанной рафинирующей смеси, обеспечивающий адсорбционно-флотационное рафинирование расплавов дисперсными компонентами при внепечной обработке расплава в ковше. Флотирующая способность образующегося газа подтверждена моделированием в программном комплексе FLOW-3D. За счет обработки стали РСУ в ковше на один кубический сантиметр расплава придется 7762 штук газообразующих частиц. Барботаж расплава при сливе его в ковш увеличивает равномернее распределение пузырьков в объеме жидкого металла и рафинирующую способность смеси. После диссоциации карбонатов образуется легкоплавкий шлак с температурой плавления 1100 °С, с высокой основностью и практически нулевой окисленностью, который, коагулируя, легко адсорбируют сульфиды, а также оксиды, такие как FeO, MnO и образующиеся в результате раскисления стали алюминием Al_2O_3.

7. Теоретически доказано, что высокая результативность модификатора для устранения отбела в чугуне достигается за счет наличия в нем дисперсных частиц кремния, которые способствуют опережающему аномальному выделению графитной фазы. Замещая атомы железа, кремний стремится изменить гранецентрированную упаковку атомов железа на менее плотную, объемоцентрированную, которая позволяет свободно диффундировать атомам углерода.

8. Показано, что в качестве второго компонента модификатора необходимо использовать частицы углерода наиболее близкие по форме к графиту чугуна, способные выполнять роль зародышевых центров и контролировать присоединение атомов углерода, вытесняемых кремнием. Таким образом, управлять кристаллизацией расплава чугуна необходимо использованием в качестве модифицирующих добавок смеси порошков кремния и графита. Эти два элемента могут обеспечить максимальную результативность модифицирования, что гарантирует низкую себестоимость смесей. Для существенного уменьшения расхода модификатора необходимо диспергирование материалов.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В ПЕЧАХ С ОСНОВНОЙ ФУТЕРОВКОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННЫХ ДИСПЕРСНЫХ РЕАГЕНТОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ОТЛИВОК ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

3.1. Разработка технологического процесса выплавки стали 110Г13Л методом переплава с использованием дисперсных смесей при производстве ответственных железнодорожных отливок «крестовины железнодорожные»

3.1.1. В условиях АО «Керченский металлургический завод»

В АО «Керченский металлургический завод» (КМЗ) производят особо ответственные железнодорожные отливки — крестовины железнодорожные — по ГОСТ 7370 [39]. Химический состав отливок из стали 110Г13Л по ГОСТ 7370 представлен в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Содержание элементов в стали 110Г13Л

Содержание элементов, % по массе				
C	Mn	Si	P	S
			не более	
1,00–1,30	11,50–16,50	0,30–0,90	0,090	0,020

σ_B и KC^{+20} по ГОСТ 7370 не могут быть ниже минимальных требований, указанных в табл. 3.2. Группу металла определяют по низшему из показателей механических свойств. В микроструктуре отливок должен присутствовать аустенит без карбидов.

Таблица 3.2

Механические свойства отливок из стали 110Г13Л

Показатель	Показатели механических свойств для группы стали		
	1	2	3
σ_B Н/мм (кгс/мм)	Более 883 (90)	Более 785 (80) до 883 (90) включительно	Более 687 (70) до 785 (80) включительно
σ_T, Н/мм (кгс/мм), не менее	353 (36)	353 (36)	353 (36)
δ, %	Более 30	Более 25 до 30 включительно	Более 16 до 25 включительно
ψ, %	Более 27	Более 22 до 27 включительно	Более 16 до 22 включительно
KCU^{+20}, Дж/см(кгс·м/см)	Более 245 (25,0)	Более 196 (20) до 245 (25) включительно	Более 167 (17) до 196 (20) включительно

Как видно из данных табл. 3.2, механические свойства стали высоки даже для отливок третьей группы качества. Получить такие механические свойства с использованием метода переплава на КМЗ не удавалось. Для их обеспечения КМЗ производил литье из стали 110Г13Л с использованием метода окисления. Это привело к накоплению большого количества собственного возврата и лома Б22 на предприятии.

Снижение себестоимости продукции и одновременное повышение механических и эксплуатационных свойств отливок из стали 110Г13Л стало актуальной задачей в связи с возрастающей конкуренцией за рынки сбыта продукции. Эту задачу на КМЗ при выплавке стали 110Г13Л можно решить использованием наиболее экономичного метода переплава.

При плавке отходов методом переплава стали 110Г13Л в шихте на заводе использовали амортизационный лом этой марки стали (зубья экскаваторов, стрелочные переводы, траки и др.), но чаще всего использовали собственный возврат, а именно: брак литья, прибыли, литники, сливы, скрап и т. п. Восстановительный период проводили под шлаком периода плавления. На КМЗ для восстановления оксидов марганца и железа на шлак присаживали известь, плавиковый шпат, коксик и ферросилиций ФС65 в количестве 8 кг/т годного. Получение требуемого суммарного содержания закиси марганца и закиси железа (<5%) в предвыпускном шлаке осуществляли увеличением продолжительности восстановительного периода плавки и повышением интенсивности обработки шлака раскислительной смесью. Но это чаще всего не обеспечивало требуемого восстановления марганца и железа из шлака. В результате снижался уровень механических свойств, который не соответствовал требованиями ГОСТ 7370, снижалась жидкотекучесть стали, что увеличивало количество брака по причинам «горячая трещина» и «спай» при одновременном увеличении затрат на производство. Поэтому метод переплава на заводе практически не использовали.

Для решения задачи обеспечения механических свойств стали, выплавляемых методом переплава, в соответствии с требованиями ГОСТ 7370 использовали разработанный новый запатентованный способ выплавки стали 110Г13Л методом переплава [243], включающий три направления интенсификации выплавки стали, эффективность которых теоретически доказана в главе 2. Новый способ выплавки позволял также уменьшить потери Mn при расплавлении металла, увеличить результативность диффузионного раскисления расплава, снизить расход электроэнергии и ферросплавов.

Плавка № 1200032 от 21.01.2020

Изготавливались отливки У1740 и 2307 «Сердечник». Существенным недостатком при плавке стали на шихте из легированного лома и собственного возврата является высокий угар марганца, что резко снижает экономичность метода переплава.

Поэтому первое направление совершенствования технологического процесса метода переплава заключалось в организации раннего наведения шлака во время плавления шихты, что, согласно теоретическим предпосылкам, обеспечивало уменьшение времени плавления шихты, за счет этого резкое снижение угара марганца, уменьшение количества MnO в шлаке и экономию электроэнергии.

Использовали шихту, состоящую из брака отливок, сливов, скрапа, литников и высечки механического цеха из стали 110Г13Л. Кроме того, в шихту добавляли 6% собственного возврата стали 35Л. Вес металлозавалки составлял от 3100 кг. На подину было подано 120 кг известняка (40 кг/т жидкого). Сверху, равномерно распределив по поверхности известняка, загрузили флюс разжижитель шлака (РШ) в количестве 15 кг (5 пакетов) из расчета 5 кг/т жидкого для раннего наведения шлака, ускорения тем самым плавления шихты, снижения угара марганца.

Затем загрузили шихту в количестве 3100 кг. Состав шихты приведен в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Состав шихты

№ пп	Наименование	Количество, кг
1	Лом стали 110Г13Л	1000
2	Высечка ЦСП	300
3	Собственный возврат	200
4	Сливы	1600
	Итого:	3100

Рассчитали количество марганца, внесенного шихтой:

K_{Mn}=(1000×13%) + (300×0,8%) + (200×14%) + (1600×14%)=130 + 2,4 + + 28 + 224=384,4 кг, или 12,4%.

Плавление шихты шло в штатном режиме. Однако уже через десять минут после начала плавления уменьшился шумовой эффект. Электрические дуги начинали гореть устойчиво, монотонно и тихо, что косвенно свидетельствовало о раннем появлении шлака в колодцах, прорезаемых дугами. Он заполнял колодцы на 10 минут раньше, чем в рядовых плавках. Наведенный шлак экранировал дуги в колодцах. Экранирование дуг в колодцах жидкоподвижным шлаком способствовало ускоренному нагреванию шлака и металла, снижению тепловых потерь и, соответственно, уменьшению времени плавления шихты и экономии электроэнергии. Время расплавления шихты уменьшилось на 10 минут по сравнению с рядовыми плавками.

На печи ДСП-6 используется трансформатор ЭЦТП-10000/10-УХЛ4 с номинальной мощностью 5000 кВа. Плавление ведется на 1 ступени с максимальной мощностью равной 5000 кВа. Экономия электроэнергии за 10 минут работы печи составит 5000/60·10=833 кВт на одну плавку, или

104 кВт/т. При цене 1 кВт, равной 5 рублей, экономия составит 4165 рублей на одну плавку, или 520 руб/т.

Кроме того, немаловажно, что после заполнения шлаком колодцев, прекращался контакт плавящейся шихты с кислородом воздуха, что снижало угар марганца и других элементов в стали. Динамика изменения химических составов металла и шлаков в различные периоды плавки приведены в табл. 3.4, 3.5.

Таблица 3.4

Химический состав металла по ходу плавки

Период плавки	Химический состав, % по массе								
	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	V
По расплаву	1,034	0,41	12,08	0,0389	0,0034	0,1373	0,0831	0,0373	0,002
После раскисления и доводки	1,067	0,33	13,95	0,0396	0,0036	0,0,2026	0,0915	0,0376	0,0185
Ковшовая	1,128	0,45	14,46	0,04	0,0037	0,016	0, 961	0,039	0,002

Таблица 3.5

Химический состав шлаков по ходу плавки

№ пробы	Наименование	Химический состав, % по массе						Основность, B
		MnO	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	
1	после расплавления	14,43	4,89	19,45	15,38	34,05	5,26	2,02
2	после диффузионного раскисления РДА	5,17	0,99	18,38	13,35	37,84	5,22	2,34
3	после ковшевой обработки РСУ	4,03	0,31	19,34	9,83	37,26	6,59	2,26

Как видно, во время плавления шихты происходил угар марганца и железа. В результате шлак после расплавления был черного цвета, так как отличался высоким содержанием FeO (4,89%) и MnO (14,43%) (табл. 3.5). Такие шлаки требуют интенсивного диффузионного раскисления.

Вместе с тем следует отметить, что присадка РШ в завалку и раннее наведение шлака уменьшило угар элементов. Количество марганца, внесенного шихтой, равнялось 12,43%. Как следует из данных табл. 3.4, концентрация марганца в расплаве после расплавления шихты достигла 12,08%. То есть угар марганца составил 0,32%. Это предопределило относительно невысокое содержание MnO в шлаке, равное 14,43% (табл. 3.5). Как показывает практика, без применения РШ угар марганца значительно выше, а, соответственно, и количество MnO в шлаке увеличивается до 28–35% [77, 239], что существенно усложняет задачу восстановительного периода плавки и в конечном итоге получения качественной стали методом переплава. Следует отметить, что шлак по расплавлению получился жидкоподвижный и реакционноспособный за счет внесения в него соединений натрия, калия и

Al_2O_3 присутствующих в РШ, что облегчило проведение восстановительного периода плавки. Таким образом, подтвердили теоретические предпосылки о целесообразности раннего наведения шлака и результативности, разработанного НІ.

На качество металла решающее значение оказывает восстановительный период плавки. Велико влияние шлаков на конечный результат плавки 110Г13Л. Они должны быть высокоосновными и рассыпающимися в белый порошок с содержанием в сумме FeO и MnO≤5%. Чем меньше оксидов железа и марганца в шлаке, тем меньше их будет и в металле. Поэтому второе направление совершенствования технологии заключалось в более эффективном диффузионном раскислении стали [239]. Восстановительный период проводили под шлаком периода плавления. Взамен смеси ФС65, коксика и плавикового шпата, используемых на заводе для диффузионного раскисления, применили раскислитель диффузионный алюмосодержащий (РДА). При использовании традиционной заводской смеси она ложилась на шлак локально и очень медленно расходилась. Для эффективного раскисления необходимо было вручную равномерно распределить ее по периметру печи. Расход смеси составлял 8 кг/т жидкого.

После расплавления начинали диффузионное раскисление. Рациональную присадку РДА определили экспериментально. Для этого выбрали способ с наименьшей трудоемкостью определения эффективности раскисления по цвету шлака, который является индикатором качества металла. После расплавления шлак был черным, что свидетельствовало о высоком содержании FeO (4,89%) и MnO (14,43%) (табл. 3.5). Диффузионное раскисление проводили следующим образом. На шлак присаживали РДА частями по 6 кг (2 пакета). Отмечено быстрое действие РДА по сравнению с заводской смесью. Диссоциация карбонатов, входящих в состав РДА, по реакции (2.30) и реакции (2.31) УСМ с оксидами шлака способствовала принудительному вспениванию и перемешиванию шлака, что позволяло составляющим РДА быстро покрывать поверхность шлака. За счет вспенивания шлак поднимался и полностью закрывал дуги. В результате уменьшались колебания силы тока и напряжения**,** о чем свидетельствовало уменьшение шумового эффекта, более тихое и стабильное их горение. Дуги были защищены от контакта с атмосферой печи, что позволяло более полно использовать подводимую мощность трансформатора [126]. Сразу же начинались интенсивный нагрев, раскисление и разжижение шлака. Процесс длился 4 минуты, после чего шлак начал медленно оседать, что свидетельствовало об окончании реакций диссоциации карбонатов и восстановления оксидов углеродом.

По окончании реакций раскисления первой части РДА брали шлак на визуальный и химический анализ. Затем отдавали в печь очередные 6 кг (2 пакета) раскислителя и ждали окончания процесса раскисления и так далее. После подачи каждой очередной порции раскилителя шлак светлел. Перед началом раскисления шлак был черного цвета. После присадки 6 кг РДА корка

шлака приобрела коричневую окраску, а в изломе шлак посветлел, но не рассыпался в порошок. Когда на шлак присадили 12 кг РДА, после окончания реакции он существенно посветлел и после остывания рассыпался, но в порошок серого цвета. После присадки 18 кг шлак после остывания превратился в белый порошок.

Таким образом, рациональная присадка РДА равнялась 18 кг (6 пакетов) или 6 кг на одну тонну жидкого. После раскисления РДА шлак был жидкоподвижным, равномерно распределенным по зеркалу металла и реакционноспособными. После остывания он рассыпался в белый порошок (рис. 3.1), что свидетельствовало об удовлетворительной основности шлака (В=2,34) и резком уменьшении оксидов марганца (5,17%) и железа (0,99%) в шлаке, что подтверждается данными табл. 3.5. Таким образом, РДА оказался достаточно технологичным раскислителем. В дальнейшем для диффузионного раскисления использовали установленное рациональное количество смеси 6 кг/тж.



Рисунок 3.1. Шлак после диффузионного раскисления РДА

Вместе с тем концентрации оксида марганца и железа в шлаке, равные, %масс, 5,17 и 0,99, необходимо уменьшить. Поэтому для гарантированного повышения механических свойств стали 110Г13Л применили третье направление совершенствования технологического процесса — внепечную обработку расплава в ковше рафинирующей смесью универсальной (РСУ), обеспечивающую дальнейшее очищение металла от оксидов марганца железа и алюминия, а также сульфидов и других неметаллических включений [239].

На дно ковша загружали 20 кг (2 мешка) рафинирующей смеси РСУ. Последняя способствовала флотационно-адсорбционному очищению расплава. Вначале образующиеся в результате диссоциации карбонатов создавали флотирующий эффект, а затем образовывался легкоплавкий, жидкоподвижный, высокоосновный шлак, активизировался процесс восстановления марганца и железа из шлака и тем самым процесс

рафинирования расплава от неметаллических включений и газов. Это подтверждено химическим составом шлака после внепечной обработки. Согласно данным табл. 3.5 концентрации оксидов Mn и Fe в шлаке после внепечной обработки уменьшились до 4,03 и 0,31%. Это положительно отразилось на микроструктуре и механических свойствах стали, которые приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Механические свойства и микроструктура стали

№ пп	σ_T кгс/мм^2	σ_B кгс/мм^2	δ, %	ψ, %	KCU, кгс·м/см^2	Микроструктура	Группа качества
1	43,9	80,6	31,3	26,5	20,2	Аустенит без карбидов	II

Химический состав плавки соответствовал требованиям ГОСТ 7370 (табл. 3.6). Микроструктура отвечала требованиям НТД на отливки. Механические свойства стали соответствовали требованиям 2-й группы качества, что подтверждает эффективность предложенной технологии и справедливость теоретических разработок.

По разработанной технологии провели еще 4 плавки. Их результаты приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Качественные показатели плавок стали

№ плавки	σ_T кгс/мм^2	σ_B кгс/мм^2	δ, %	ψ, %	KCU, кгс·м/см^2	Группа качества
1	42,8	82,0	37,7	26,5	21,1	II
2	45,1	90,2	49,0	34,3	26,1	I
3	43,6	83,1	36,6	26,5	22,2	II
4	42,7	95,4	49,1	35,6	27,3	I

Анализ таблицы показывает, что разработанный способ выплавки методом переплава с применением дисперсных смесей РШ, РДА и РСУ обеспечивает высокие механические свойства, отвечающие требованиям 1-й и 2-й групп, не уступающие механическим свойствам стали, выплавляемых с окислением, что подтвердило справедливость теоретических предпосылок, изложенных в главе 2.

В процессе экспериментов установлено [239]:

– Ранее наведение шлака с использованием РШ из расчета 5 кг на тонну шихты позволило уменьшить время плавления шихты от 9 до 15 минут и экономить электроэнергию от 749 до 1250 квт. Гарантировать низкий угар марганца во время плавления от 0,6 до 0,95%. Обеспечить концентрации MnO в шлаках от 14 до 18% и FeO от 0,9 до 1,2%.

– Использование РДА во время диффузионного раскисления в количестве 6 кг на тонну жидкого позволило эффективно раскислить шлак. Шлаки имели основность ≥2 и рассыпались в белый порошок. Концентрации MnO в шлаках достигали от 4,5 до 6% и FeO от 0,9 до 1,2%.

– Использование РСУ для внепечной обработки расплава в количестве 5 кг на тонну жидкого позволило достичь снижения концентрации MnO в шлаках от 4 до 5% и FeO от 0,35 до 0,45%.

– Установлено технологические преимущества смесей РШ, РДА и РСУ, заключающееся в том, что они фасуются в пакеты по 3 и 10 кг, что облегчает точность дозирования и контроль за рациональным расходованием материалов.

Важно, что разработанный способ выплавки стали 110Г13Л методом переплава с применением дисперсных смесей РШ, РДА и РСУ обеспечивает высокие механические свойства стали, и служебные характеристики отвечающие требованиям 1-й и 2-й групп, не уступающие механическим свойствам стали, выплавляемых с окислением, что подтвердило справедливость теоретических предпосылок, изложенных в главе 2.

Расчет ожидаемого экономического эффекта, произведенный заводом, показал высокую эффективность разработанной технологии. Только экономия от замены материалов составит 16 242,9 рубля на плавку.

Это дало возможность внедрить разработанную технологию в производство. Очень важно, что новый способ выплавки марганцовистой стали методом переплава наряду с повышением механических свойств металла и эксплуатационной надежности отливок, позволил резко уменьшить себестоимость литья [18].

3.1.2. В условиях АО «Муромский стрелочный завод»

В АО «Муромский стрелочный завод» также производит ответственные отливки из высокомарганцовистой стали аустенитного класса марки 110Г13Л «Крестовины железнодорожные. Плавка стали в АО «Муромский стрелочный завод» ведется в дуговых печах с основной футеровкой ДС-6Н1. Металлозавалка составляет 8 тонн. Шихтовые материалы состоят в основном из лома углеродистой стали, возврата собственного производства, а также ферросплавов: ферромарганца ФМн 78, ФМн 88, ферросилиция ФС 45. Для раскисления стали применяется технический алюминий. 70% плавок проводят методом окисления. По мере накопления возврата и брака проводят плавки стали методом переплава. Количество их составляет 30% от общего числа плавок.

Заливку форм производят из стопорного ковша емкостью 8 тонн. Температура заливки составляет 1460–1480 °С.

Произвели анализ выплавленного в 2021 году металла по группам механических свойств, который приведен в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Результаты определения групп качества металла в 2021 году

	Количество плавок					
	1-я группа, шт.	1-я группа, %	2-я группа, шт.	2-я группа, %	3-я группа, шт.	3-я группа, %
Среднее за год	169	29,14	318	54,83	90	15,52

Как видно из данных таблицы, брака отливок по механическим свойствам не было. Вместе с тем количество плавок 1-й группы составило только 29,14%. Учитывая возрастающее требования РЖД к этим отливкам, этого явно недостаточно. Для повышения количества плавок 1-й группы в АО «МСЗ» внедрили три разработанных направления совершенствования технологического процесса плавки с применением разработанных материалов РШ, РДА и РСУ, опробованных и внедренных в АО «КМЗ» [283]. В качестве первого направления совершенствования технологического процесса применили опробованное раннее наведение шлака во время плавления шихты. Для этого на подину печи загружали известняк в количестве 50 кг/т жидкого и по его поверхности равномерно распределяли флюс РШ в количестве 5 кг/т жидкого. Второе направление — это повышение эффективности диффузионного раскислении стали С помощью раскислителя диффузионного алюмосодержащего (РДА) в количестве 6 кг на 1 т жидкой стали. Третье направление заключалось во внепечной обработке расплава в ковше рафинирующей смесью универсальной (РСУ) в количестве 5 кг/т.

Произвели статистический и регрессионный анализы показателей 306 плавок, выплавленных в 2022 году после внедрения новой разработанной технологии. Для объективной оценки технологичности нового процесса плавки такого количества плавок вполне достаточно. Принятый уровень значимости в расчетах равнялся 0,05. Результаты статистической обработки приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Результаты статистической обработки плавок

Переменные	Результаты статистики						
	Кол. плавок	Среднее	Минимум	Максимум	Дисперсия	Ср. кв. отклонение	Коэф. вариации, V, %
Т заливки	305	1468,049	1443,000	1480,000	62,475	7,90408	0,5384
C	306	1,217	1,124	1,300	0,001	0,02972	2,4416
Mn	306	13,312	10,820	15,220	0,594	0,77039	5,7870
Si	306	0,519	0,250	0,767	0,005	0,07195	13,8521
P	306	0,032	0,003	0,049	0,000	0,00512	16,2647
S	305	0,005	0,002	0,100	0,000	0,00572	119,3194
Cr	306	0,113	0,070	0,180	0,000	0,01768	15,5772

Переменные	Результаты статистики						
	Кол. плавок	Среднее	Минимум	Максимум	Дисперсия	Ср. кв. отклонение	Коэф. вариации, V, %
Al	304	0,007	0,001	0,020	0,000	0,00351	48,6604
Ni	306	0,063	0,039	0,156	0,000	0,01076	17,0065
Cu	306	0,081	0,052	0,124	0,000	0,01030	12,7974
V	306	0,021	0,009	0,029	0,000	0,00356	16,8995
Mo	302	0,037	0,011	0,277	0,000	0,01882	51,5543
W	109	0,023	0,010	0,064	0,000	0,01202	52,9089
FeO	303	1,409	0,450	3,140	0,151	0,38811	27,5528
MnO	303	10,75	2,520	19,080	5,900	2,4291	22,57
Пр. прочн	306	87,670	71,000	101,000	39,325	6,27096	7,1529
Пр. тек	306	41,884	30,500	53,500	9,404	3,06655	7,3215
Отн. удл.	306	50,124	30,000	74,000	73,860	8,59418	17,1458
Отн. суж.	306	33,536	25,000	56,000	13,915	3,73029	11,1233
КС	306	29,151	19,800	37,000	7,888	2,80864	9,6349
Гр. качества	306	1,690	1,000	3,000	0,411	0,64148	37,9677

Прежде всего проанализировали механические свойства по группам качества стали. Наглядно они представлены гистограммой, которая приведена на рис. 3.2.

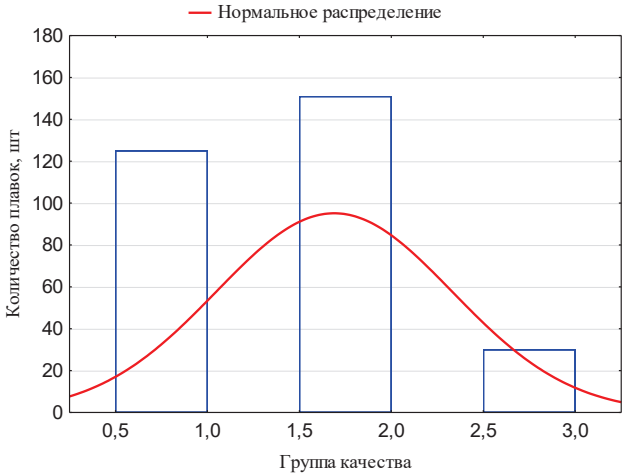


Рисунок 3.2. Группы качества стали по механическим свойствам

Как видно из гистограммы (рис. 3.2) количество плавок первой группы составило 126 штук, или 41,1%. Это значительно выше, чем до внедрения

инноваций, где их количество составляло только 29,14%. Это свидетельствует об эффективности разработанных технологических новинок и подтверждает теоретические предпосылки.

Вместе с тем количество плавок первой группы необходимо увеличить. Для этого использовали возможности статистического анализа и продолжили анализ полученных результатов статистики. Из данных табл. 3.9 следует, что наиболее стабильна температура заливки стали (V=0,5384%). Ее значения не превышают допустимый верхний предел, равный 1480 °С, что особенно важно для качественных показателей выплавляемой стали. Концентрации основных элементов, определяющих качество стали, C, Si и Mn, которые обеспечивают сталевары во время выплавки добавками ферросплавов и количество которых определяют расчетным путем, удовлетворяют требованиям НТД и также достаточно стабильны (V=2,44; 5,78 и 13,85% соответственно). Концентрации фосфора, в среднем равные 0,032%, значительно ниже допустимых НТД пределов равных 0,09%. Вышесказанное свидетельствует о профессионализме сталеваров и удовлетворительной технологической дисциплине на участке плавки.

Концентрации элементов, вносимых шихтовыми материалами менее стабильны, но в целом шихтовые материалы обеспечивают возможность выполнения требований нормативно-технической документации по механическим свойствам.

Из данных табл. 3.9 следует, что средние концентрации MnO и FeO в шлаках высокие и равняются 10,75 и 1,409%, при низкой стабильности (V=22,57 и 27,55% соответственно). Это оказывает влияние на усвоение алюминия при ковшовом раскисления стали. Концентрации его в расплаве наблюдаются в широких пределах — от 0,001 до 0,020% — при очень высоком V=49,21%. Вышеперечисленные переменные оказывает неблагоприятное влияние на микроструктуру и механические свойства стали. Поэтому для повышения количества плавок первой группы диффузионному раскислению стали следует уделить более пристальное влияние.

Вернемся к табл. 3.9. Статистический анализ показывает, что средние значения предела текучести, относительного удлинения и сужения, а также ударной вязкости равны 41,8 кгс/мм^2, 50,14%, 33,53% и 29,15 кгс·м/см^2 соответствуют первой группе качества, а среднее значение предела прочности при растяжении равное 87,61 кгс/мм^2 соответствует только 2-й группе качества. Произвели анализ предела прочности при растяжении, который представлен на гистограмме.

Как видно, только 40% значений σ_B соответствует 1-й группе качества, остальные соответствуют 2-й и 3-й группам. Эти данные тесно коррелирует с количеством плавок 1-й группы (рис. 3.2). Отсюда можно сделать вывод, что для повышения количества плавок первой группы прежде всего необходимо повышать σ_B.

Чтобы выявить основные факторы, влияющие на σ_B выплавляемой стали, произвели регрессионный анализ зависимости этого показателя от

химического состава стали и шлаков, а также температуры заливки. Прибегли к пошаговой регрессии, когда независимые переменные исключают из анализа по одной на каждом шаге до достижения конечной цели лишь с теми переменными, которые наиболее значимы для регрессии. Результат пошаговой регрессии показан в табл. 3.10.

Таблица 3.10

Коэффициенты пошаговой регрессии

N=295	Стандартная оценка	Ср. кв. отклонение стандартной оценки	Коэф. регрессии	Ср. кв. отклонение коэф. регрессии	T (224) t критерий	p-value уровень значимости коэффициента регрессии
Свободный член			–92,8272	48,41074	–1,91749	0,056161
Mn	**0,707880**	**0,040944**	**5,7731**	**0,33391**	**17,28913**	**0,000000**
Mo	**0,091620**	**0,041472**	**30,4326**	**13,77537**	**2,20920**	**0,027945**
Si	–0,095633	0,041208	–8,4243	3,62997	–2,32076	0,020996
T заливки	0,092365	0,041282	0,0737	0,03293	2,23743	0,026020
FeO	–0,057213	0,041202	–0,9224	0,66427	–1,38862	0,166018

Уравнение регрессии имеет вид:

$$\sigma_B = -92{,}82 + 0{,}0737t_{ЗАЛ} + \mathbf{5{,}7731Mn} - 8{,}42Si - 0{,}924FeO + 30{,}43Mo.$$

Значимые коэффициенты регрессии программа выделяет красным цветом. Отрицательные значения коэффициентов при переменных свидетельствуют о необходимости их уменьшения в стали для повышения $\boldsymbol{\sigma_B}$. Положительные значения коэффициентов при переменных свидетельствуют, наоборот, о необходимости их увеличения в стали для повышения $\boldsymbol{\sigma_B}$. **Таким образом, в расплаве прежде всего следует увеличивать концентрацию марганца, температуру заливки и уменьшать содержание кремния и оксида железа в шлаке.**

Из данных табл. 3.10 следует, что только молибден оказывает положительное влияние на величину σ_B. Это подтверждает, что шихтовые материалы, применяемые в АО МСЗ, обладают удовлетворительным качеством и обеспечивают требуемые механические свойства и группы качества выплавляемых сталей.

Данные табл. 3.10 показывают, что самое существенное влияние на σ_B оказывают концентрации марганца в расплаве, так как значимость коэффициента при переменной марганца на 5 порядков ниже принятого статистического уровня значимости, равного 0,05. На втором месте по степени влияния на $\boldsymbol{\sigma_B}$ оказывает содержание кремния, затем температура заливки. Также важно содержание FeO в шлаке. P-value=0,166, что ближе к 0,05, чем у всех остальных компонентов. Остальные переменные в пределах

концентраций, достигнутых на заводе сталеварами, практически не влияют на величину предела прочности.

Для дальнейшего повышения предела прочности при растяжении и тем самым увеличения количества плавок 1-й группы качества прежде всего необходимо повысить концентрацию марганца в металле до 14% и выше. Содержание кремния необходимо выдерживать в количестве, достаточном для раскисления <0,6%. Немаловажно совершенствовать технологию диффузионного раскисления. Для этого целесообразно во время восстановительного периода плавки заменить крупнокусковую карбонатную породу на основе $CaCO_3$ на известь, обожженную CaO.

В мае 2023 г. провели 63 плавки стали с трех стадийным совершенствованием технологического процесса и с учетом разработанных с помощью регрессионного анализа результатов плавок рекомендаций по повышению групп качества металла. Произвели статистическую обработку 63 плавок. Результаты представлены в табл. 3.11. Количество плавок трех групп представлено на рис. 3.3.

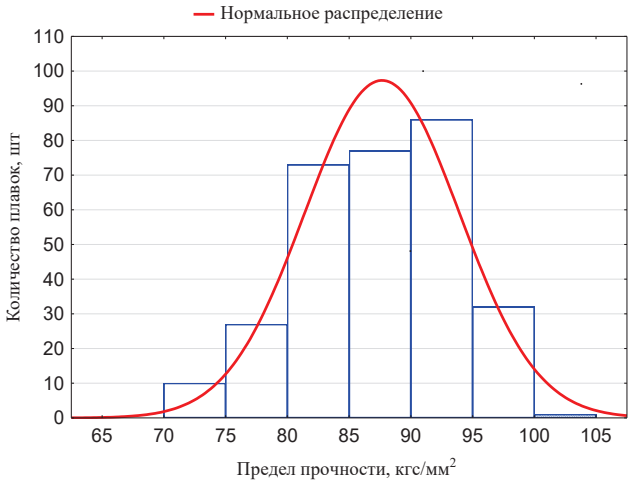


Рисунок 3.3. Гистограмма предела прочности при растяжении

Прежде всего следует отметить эффективность разработанных рекомендаций. Количество плавок 1-й группы выросло до 71% (рис. 3.4, 3.5). Как показывает динамика изменения количества плавок 1-й группы в зависимости от технологического процесса по сравнению с 2021 годом их количество увеличилось на 62%. Рекомендации позволили повысить результативность внедренных трех направлений повышения качества стали на 43% (рис. 3.5).

Таблица 3.11

Результаты статистической обработки плавок, выплавленных в мае 2023 года

Переменные	Статистика плавок, май 2023						
	Кол. плавок	Среднее	Минимум	Максимум	Дисперсия	Ср. кв. отклонение	Коэф. вариации, V, %
C	63	1,102	1,010	1,150	0,00137	0,037046	3,36102
Mn	**63**	**14,584**	**12,490**	**15,890**	**0,29437**	**0,542559**	**3,72020**
Si	63	0,507	0,300	0,680	0,00574	0,075775	14,93218
Al	63	0,008	0,001	0,040	0,00004	0,005921	76,27962
Cr	63	0,131	0,090	0,220	0,00057	0,023976	18,23796
P	63	0,031	0,016	0,042	0,00003	0,005375	17,11890
Расход извести	31	99,677	90,000	100,000	3,22581	1,796053	1,80187
FeO	**62**	**1,311**	**0,560**	**3,480**	**0,38476**	**0,620286**	**47,32097**
MnO	**62**	**7,569**	**2,180**	**15,700**	**10,48321**	**3,237779**	**42,77575**
Сумма	62	8,864	2,960	16,820	11,77126	3,430927	38,70475
Т-ра выпуска	63	1514,254	1500,000	1530,000	67,12801	8,193168	0,54107
Т-ра заливки	63	1466,429	1451,000	1487,000	27,05530	5,201471	0,35470

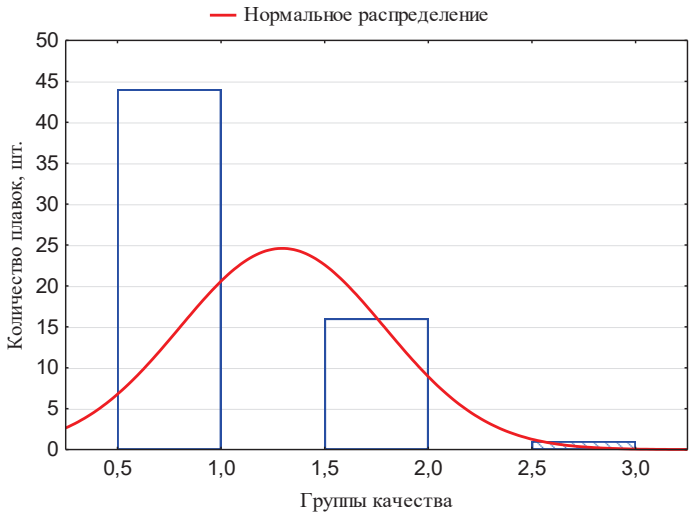


Рисунок 3.4. Гистограмма групп качества стали

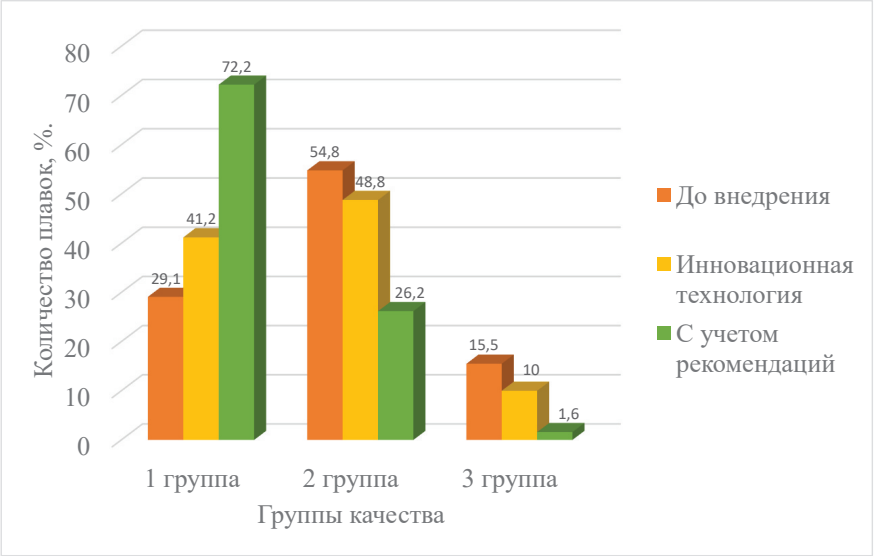


Рисунок 3.5. Динамика изменений количества плавок различных групп качества от технологического процесса

Этому способствовало увеличение концентрации марганца в стали в среднем с 13,31 до 14,58%, то есть на 8,7% (табл. 3.9, 3.11), уменьшение концентрации FeO в шлаке в среднем с 1,409 до 1,311%, то есть на 6,9% (табл. 3.9, 3.11) и более существенное сокращение MnO в шлаке с 10,75 до 7,56%, то есть на 29,6% (табл. 3.9, 3.11). Концентрации марганца в плавках увеличивали дополнительными добавками ФМн при доводке расплава по химсоставу. Усилению рафинирования шлака способствовала замена известняка на обожженную известь при проведении восстановительного периода плавки. Шлаки получались более высокоосновными и реакционноспособными. При этом расход извести уменьшился в 2 раза до 100 кг (табл. 3.11) по сравнению с использованием карбонатной породы; резко сократилась трудоемкость работы сталеваров, уменьшилось время восстановительного периода плавки и расход электроэнергии. Наметили пути дальнейшего повышения количества плавок 1-й группы качества. Таким образом, подтвердили справедливость теоретических предпосылок и результативность статистического и регрессионного анализов при наличии обширного экспериментального материала [283, 284]. Экономический эффект от внедрения составил 1768 рублей на одну плавку.

3.2. Разработка технологического процесса диффузионного раскисления стали с применением РДА при производстве ответственных отливок «рама боковая» и «балка надрессорная»

3.2.1. В Рубцовском филиале АО «Алтайвагон»

3.2.1.1. Совершенствование конструкции и технологии формы отливки «балка надрессорная»

Перед АО «Алтайвагон» поставили задачу увеличить нагрузку на ось тележки грузового вагона с 23,5 до 25,0 тс. Особое внимание было уделено одной из наиболее нагруженных детали тележки «балка надрессорная». Для этого осуществили комплекс мер, которые включили в себя: усиление конструкции отливки, разработку новой технологии литейной формы и совершенствование технологического процесса выплавки стали 20ГФЛ для безусловного повышения эксплуатационной надежности балки.

В Рубцовском филиале АО «Алтайвагон» освоили технологию проектирования и изготовления отливки «балка надрессорная». Для этого использовали компьютерное проектирование 3D в SolidWorks, позволяющее успешно и быстро автоматизировать процесс изготовления модельных комплектов, моделировать, подготавливать конструкторскую документацию.

«Балка надрессорная» 21.28-07.10.00.001 изготавливаемая до внедрения, спроектированная в SolidWorks, изображена на рис. 3.6. Она рассчитана на осевую нагрузку 23,5 тс. Габариты отливки следующие: 2590×480×40. Вес отливки составил 561,6 кг.



Рисунок 3.6. «Балка надрессорная» 21.28, изготавливаемая до внедрения грузоподъемностью 23,5 тс

Завод получал рекламации от РЖД в связи с появлением усталостных трещин на отливки «балка надрессорная» 21.28-07.10.00.001.

Поэтому была разработана новая конструкция отливки «балка надрессорная» 9800.01.00.001 с повышенной грузоподъемностью 25 тс, спроектированная на заводе в SolidWorks и изображенная на рис. 3.7. Габариты отливки увеличены до 2590×480×40. Вес отливки составил 664,1 кг.



Рисунок 3.7. «Балка надрессорная» 9800.01.00.001 грузоподъемностью 25 тс, спроектированная в SolidWorks

Новая конструкция отливки имеет следующие преимущества. В отливке «балка надрессорная» 21.28-07.10.00.001 подпятник отливали как единое целое с отливкой (рис. 3.8а) из стали 20ГЛ, износостойкость которой низкая. Следовательно, подпятник подвергался повышенному износу при контакте с сопрягаемыми деталями. В отливке «балка надрессорная» 9800.01.00.001 подпятник не отливают (рис. 3.8б).

Его изготавливают из стали 38ХС, подвергают закалке в масле и низкому отпуску, что существенно повышает износостойкость.

Как видно из рис. 3.6 и 3.7, в «балка надрессорная» 9800.01.00.001 выполнены дополнительно шесть технологических окон по три с каждой стороны. Это, с одной стороны, существенно облегчает вес конструкции, а с другой стороны, облегчает обработку внутренней полости отливки. Шесть окон под подпятником дают возможность легко вырубать прибыли, в случае необходимости, и производить заточку внутренних поверхностей. В отливке «балка надрессорная» 21.28-07.10.00.001 доступ внутрь отливки весьма ограничен. В результате две прибыли на подпятнике внутри отливки не вырубаются, что согласовано чертежом отливки и, в свою очередь, увеличивает вес отливки. Четыре окна у периферии отливки «балка

надрессорная» 9800.01.00.001 значительно упрощают установку и крепление скользуна.



а б

Рисунок 3.8. а — «балка надрессорная» 194.00.035.0 с подпятником;
б — «балка надрессорная» 9800.01.00.001

Увеличение габаритов отливки позволило улучшить конструкцию внутренних ребер жесткости в отливке «балка надрессорная» 9800.01.00.001, увеличить толщину стенок отливки в среднем на 3 мм, что усилило прочность балки и уменьшило усталостные напряжения.

Кроме того, на отливке «балка надрессорная» 9800.01.00.001 расширили клиновой проем с наклонной площадкой под съемную фрикционную накладку, имеющую отверстия крепления и ограничителя хода, что дает возможность жестко крепить к балке износостойкую пластину, что предотвращает трение клина фрикционного о балку и износ детали (рис. 3.9).

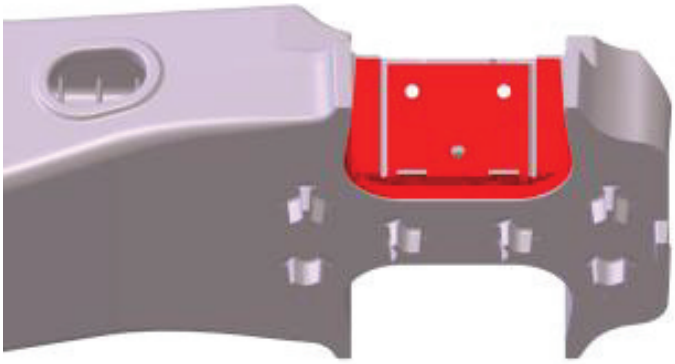


Рисунок 3.9. Площадка под съемную фрикционную накладку

Совершенствование конструкции и технологии изготовления формы железнодорожной отливки «балка надрессорная» потребовало уделить особое внимание исключению дефектов усадочного происхождения. Для этого очень важно было установить взаимосвязь кристаллизующегося металла с конструкцией литниково-питающей системы.

Возможность определить наличие в разрабатываемой отливке тепловых и гидродинамических узлов, которые при кристаллизации жидкого металла провоцируют дефекты усадочного происхождения, позволило моделирование во FLOW-3D. Анализ взаимосвязи кристаллизующегося металла с конструкцией литниково-питающей системы позволил подобрать рациональную систему питания, размеры и места установки прибылей, а также максимально сократить время на подготовку производства.

Расчет проводили в модуле «Полная задача». Моделировалось заполнение расплавом сырой песчано-глинистой формы со стержнями, изготовленными из холоднотвердеющих смесей, и последующее затвердевание отливки. После чего проводился анализ наличия дефектов усадочной природы. В случае необходимости корректировали литниковую систему. Применение моделирования позволило исключить испытания разрабатываемых литниковых систем в условиях действующего литейного цеха, что резко снизило затраты на подготовку производства модернизированной балки и уменьшило продолжительность внедрения в производство разработанной оснастки для вышеуказанной отливки.

Для определения мест возникновения литейных дефектов отливки провели моделирование 18 вариантов заливки и кристаллизации куста отливки балки надрессорной, используя различные элементы литниковой системы, часть из которых приведены ниже.

На первом этапе в литейной форме расположили две отливки. Балки расположили подпятником вверх (рис. 3.10) с целью его удовлетворительной пропитки металлом, так как он является наиболее нагруженным местом в детали при эксплуатации. Поэтому четыре цилиндрические прибыли были установлены в центре отливки на подпятнике.

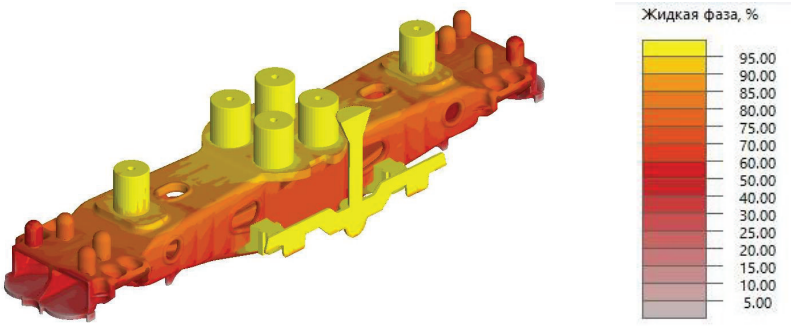


Рисунок 3.10. Жидкая фаза в отливке

Для определения мест, где могут возникнуть усадочные дефекты, произведено моделирование затвердевания отливки после заполнения формы расплавом. Анализ жидкой фазы показал (рис. 3.10), что стояк, литниковая система и прибыли застывают позже отливки, что гарантирует подпитку балки в процессе кристаллизации.

Анализ температурных полей (рис. 3.11) показывает, что кристаллизация будет направленной от периферийных частей отливки к ее центру, что является одним из условий исключения усадки с учетом того, что в центре отливки установлены массивные прибыли. Вместе с тем компьютерный расчет показал наличие усадочных раковин (рис. 3.12, 3.13) не только в стояке, прибылях и питающих бобышках, но и на нижнем поясе отливки. То есть такая конструкция литниковой системы не обеспечила бездефектного литья.

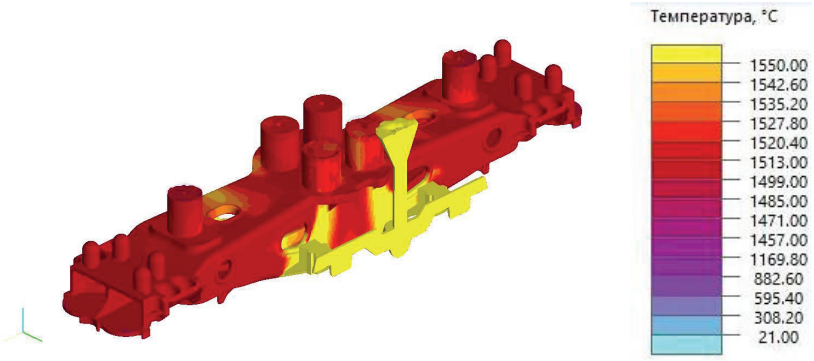


Рисунок 3.11. Анализ температурных полей в отливке

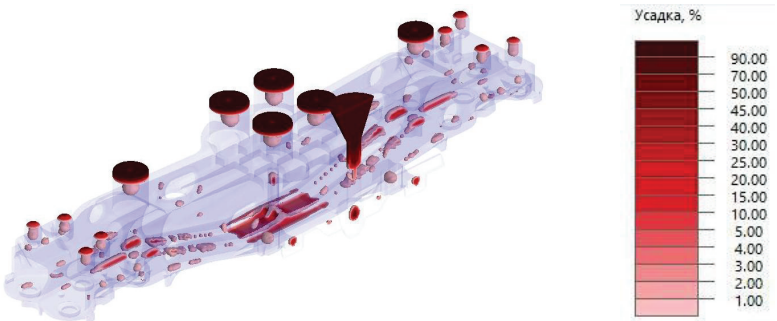


Рисунок 3.12. Анализ усадки в отливке

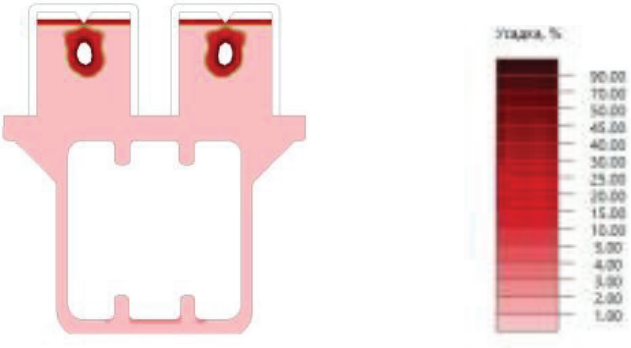


Рисунок 3.13. Усадка в нижнем поясе отливки под подпятником

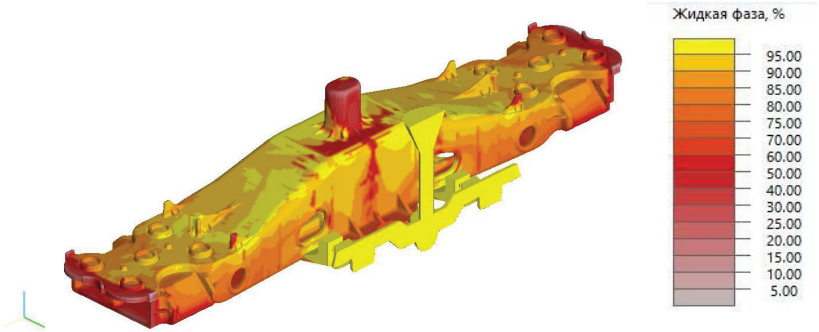


Рисунок 3.14. Жидкая фаза в отливке

Больше прибылей и питающих бобышек на модель отливки не устанавливали, чтобы изучить распределение усадочных дефектов и определить места установки прибылей и их размеры. Для поиска мест, где может возникнуть усадка, исполнили моделирование кристаллизации отливки после заполнения формы расплавом. Из рис. 3.14 следует, что стояк и литниковая система затвердевают после отливки, что гарантирует подпитку балки в процессе кристаллизации со стороны литниковой системы. Но прибыль затвердевает раньше, чем верхняя часть отливки, следовательно, она не будет работать, что и видно на рис. 3.15. Это подтверждает и анализ температурных полей, приведенный на рис. 3.16.

Наличие усадочных раковин под прибылью можно увидеть в подпятнике (рис. 3.16, 3.17), в теле отливки и на периферийных частях, где отсутствуют прибыли. Таким образом, очередная разработанная конструкция литниковой системы не обеспечила бездефектного литья.

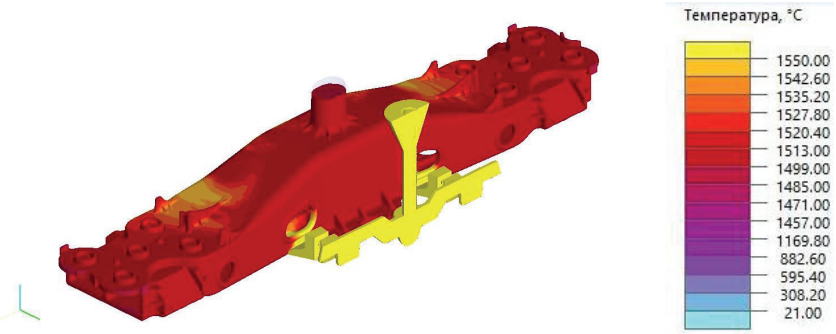


Рисунок 3.15. Анализ температурных полей в отливке

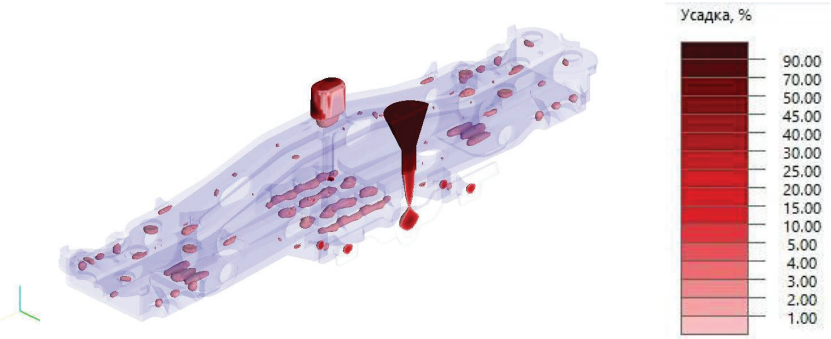


Рисунок 3.16. Анализ усадки в отливке

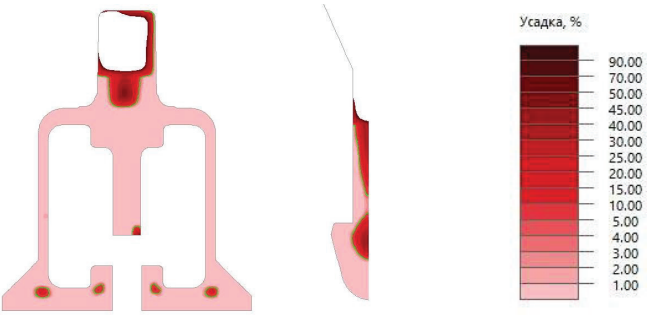


Рисунок 3.17. Анализ усадки в подпятнике отливки

Для устранения выявленных недостатков конструкции литниковой системы опробовали еще несколько вариантов, и был принят следующий из них: стояк расположили по центру формы. Подвод металла обеспечили с двух сторон в середине отливки.

Для исключения попадания шлаковых включений и засоров подвод питания осуществили через центробежные шлакоуловители, после которых установили пенокерамические фильтры. Элипсовидную прибыль повернули на 90° и смонтировали с экзотермической вставкой. Особое внимание уделили получению бездефектного подпятника, поэтому непосредственно на него установили четыре цилиндрические прибыли, что хорошо видно на рис. 3.18, выполненном с вырывом передней стенки отливки. Прибыли выполнили в стержне, в который вклеили отсекательный стержень.

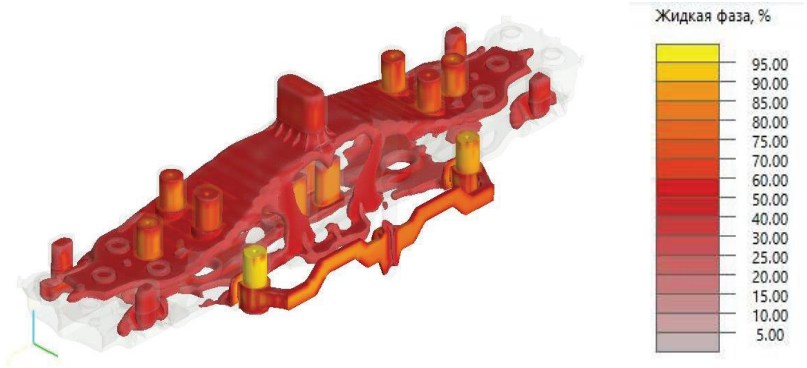


Рисунок 3.18. Жидкая фаза в отливке

Посередине отливки в месте подвода питания установили по три цилиндрические прибыли. Четыре элипсовидные прибыли установили также в районе карманов отливки. Получили приемлемый жидкостный и температурный режимы для кристаллизации отливки (рис. 3.19).

Проведя анализ полученных температурных полей, установили, что все прибыли горячих тел отливки затвердевали в последнюю очередь. Получили качественную отливку без различных дефектов. На рис. 3.20 и 3.21 хорошо видно отсутствие усадочных явлений в отливке и в подпятнике.

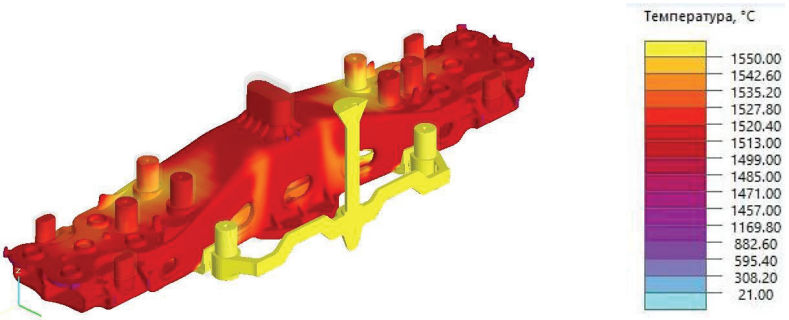


Рисунок 3.19. Анализ температурных полей

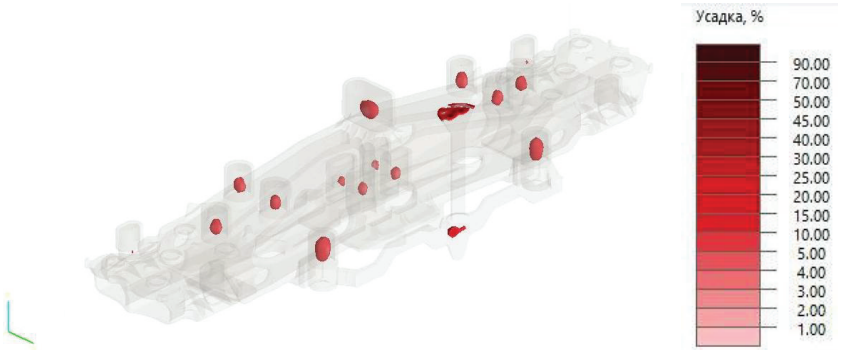


Рисунок 3.20. Анализ усадки в отливке

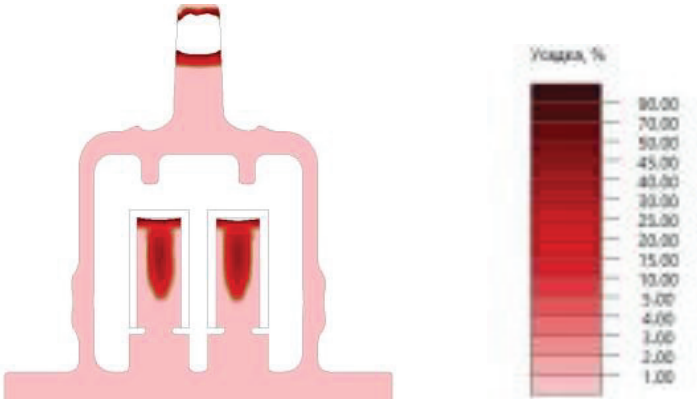


Рисунок 3.21. Анализ усадки в подпятнике отливки

Таким образом, результаты моделирования показали, что наиболее технологичный последний вариант предложенной литниковой системы, позволивший получить отливку без наличия усадочных раковин.

Кроме того, были получены важные сведения по скорости охлаждения, распределению температур в форме, времени затвердевания различных узлов.

На основании этих результатов была разработана новая конструкция отливки «балка надрессорная» 9800.01.00.001 с повышенной грузоподъемностью 25 тс [281], спроектированная на заводе в SolidWorks и изображенная на рис. 3.7.

На основании результатов моделирования спроектировали куст отливок в SolidWorks (рис. 3.22) и изготовили оснастку для производства отливки «балка надрессорная» [281].

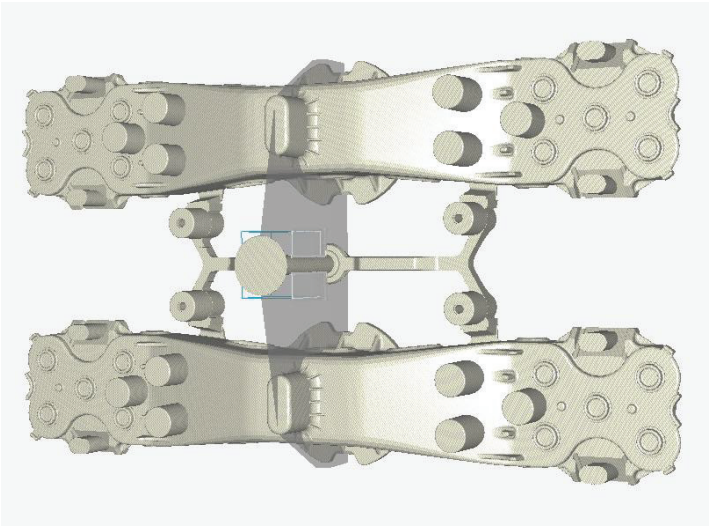


Рисунок 3.22. Модель куста отливки, выполненная в SolidWorks

Разработанная модельно-стержневая оснастка отливки «балка надрессорная» успешно используется на производстве.

3.2.1.2. Совершенисвтование технологии выплавки стали 20ГФЛ для отливок «рама боковая» и «балка надрессорная»

Для обеспечения эксплуатационной надежности разработанной отливки «балка надрессорная» и «рама боковая» необходимо было усовершенствовать технологический процесс выплавки стали 20ГФЛ. ГОСТ 32400 [30] определяет требования, предъявляемые к качественным показателям для отливок «рама боковая» и «балка надрессорная» (табл. 1.1 и 3.12).

Таблица 3.12

Механические свойства стали для отливок «рама боковая» и «балка надрессорная»

Категория свойств	Предел текучести, $\sigma_т$, МПа	Временное сопротивление, $\sigma_в$, МПа	Относительное удлинение, δ, %	Относительное сужение, ψ, %	Ударная вязкость, KCV^{-60}, кДж/м^2
Показатели*	343	510	18,0	30,0	200*
*— с 01.01 2016 года					

Рост долговечности ответственных отливок «рама боковая» и «балка надрессорная» в условиях увеличения грузоподъемности и повышения скоростей вагонов требует повышения и стабилизации в первую очередь

структурно чувствительной KCV^{-60}. Ее величина обязана достигать значений ≥200 кДж/м^2.

Для безусловного выполнения требований ГОСТ 32400 использовали преимущества электродуговых печей ДСП 6 и применили новый способ диффузионного раскисления стали с использованием дисперсной смеси РДА. До внедренческих работ плавки стали 20ГЛ проводили с окислительным периодом. В окислительный период плавки осуществляли дефосфорацию стали до ≤0,02% после чего шлак скачивали. Затем формировали шлак из известняка с добавками плавикого шпата с основностью В≥2 удаляли серу из стали и приводили компонентный состав расплава до требований НТД. Диффузионное раскисление в печи производили раскислительной смесью, состоящей из коксика, ферросилиция ФС65 и алюминия. Раскисление проводили до получения хорошо раскисленного шлака и металла, о чем свидетельствовало рассыпание остывающего на металлической плите шлака в порошок белого или серого цвета. Содержание FeO в нем, согласно НТД завода, должно быть ≤1%. Затем металл выпускали в ковш емкостью 8 тонн, где его раскисляли чушковым Al из расчета 1 кг/т жидкого. Модифицирование и внепечная обработка стали 20ГЛ не проводилась.

Провели статистический анализ химического состава и механических свойств 48 плавок стали, которые были выплавлены в течение месяца работы цеха. В процессе работы отбирали пробы для определения химического состава металла и шлака, механических свойств стали. Результаты статистической обработки представлены в табл. 3.13.

Таблица 3.13

Статистические характеристики химического состава и механических свойств сталей

	Кол. набл.	Среднее значение	Минимум	Максим.	Дисперсия	Ср. кв. откл.	Коэф. вариации, %
C, %	48	0,1966	0,1700	0,2200	0,000	0,01263	6,42442
Mn	48	1,2253	1,0500	1,4500	0,007	0,08300	6,77434
Si	48	0,3813	0,2500	0,4940	0,003	0,05612	14,71802
V	48	0,0604	0,0470	0,0770	0,000	0,00643	10,63159
Al	48	0,0314	0,0230	0,0430	0,000	0,00427	13,60605
S	48	0,01363	0,009000	0,01700	0,000007	0,002717	19,92589
P	48	0,0148	0,0080	0,0230	0,000	0,00329	22,25388
Ni	48	0,0925	0,0700	0,1200	0,000	0,01152	12,45737
Cu	48	0,1178	0,0731	0,1900	0,001	0,02422	20,56500
$\sigma_т$, MPa	48	526,458	500,0000	570,000	282,934	16,82065	3,19506
$\sigma_в$, MPa	48	347,187	320,0000	380,000	188,198	13,71853	3,95133
δ, %	48	25,3542	20,5000	31,0000	5,468	2,33830	9,22254
ψ, %	48	45,1667	36,0000	54,0000	20,738	4,55385	10,08233
KCV^{-60}, кДж/м^2	48	299,708	206,0000	500,000	6058,509	77,83642	25,97072

Анализ табличных данных, свидетельствует о том, что компонентный состав сталей удовлетворяет условиям ГОСТ 32400 и позволяет получать высокие механические свойства с высокой однородностью, отвечающие предписаниям ГОСТ 32400. Особенно это касается $\sigma_в$ и $\sigma_т$, (**V**=3,95 и 3,19% соответственно). Структурно зависимые δ и ψ менее однородны (**V** от 9,22 до 10,08%). Самая важная для железнодорожных отливок величина KCV^{-60} удовлетворяет условиям ГОСТ 32400. Однако стабильность показателя невысокая и равна 25,9%. 47% плавок имели показатели KCV^{-60} близкие к нижнему допустимому пределу по ГОСТ 32400 равному 200 кДж/м^2 (рис. 3.23), что не гарантирует в дальнейшем возможностей повышения нагрузки на ось тележки вагона, требуемых РЖД.



Рисунок 3.23. Гистограмма KCV^{-60}

Учитывая вышесказанное, провели экспериментальную работу, направленную на рост показателей KCV^{-60}. Для поиска путей повышения KCV^{-60} целесообразно изучить микроструктуру сталей проанализированных плавок, так как KCV^{-60} в наибольшей степени структурно зависимая величина. Изучили плавки, которые имели низкие показатели KCV^{-60} от 200 до 230 кДж/м^2 и высокие от 380 до 500 кДж/м^2. Следует отметить, что шлаки плавок с низкими показателями KCV^{-60} имели основность от 2 до 2,3 единиц и рассыпались в порошок серого цвета (рис. 3.24). Концентрации FeO в них были больше 1% и колебались от 1,06 до 1,69%, что и обусловило серый цвет порошков шлака.

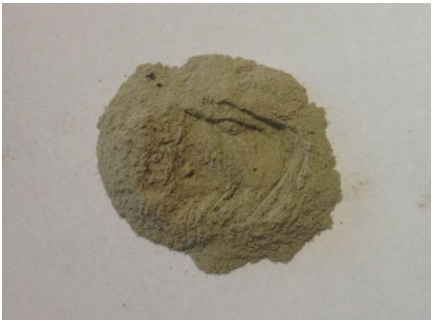


Рисунок 3.24. Порошок шлака с концентрацией FeO больше 1%

Еще одной особенностью анализируемых плавок было содержание серы в них выше среднего значения (табл. 3.13) от 0,013 до 0,017%. Следует отметить, что количество плавок с высоким содержанием серы от 0,015 до 0,017% было больше, чем остальных, что хорошо видно на рис. 3.25.

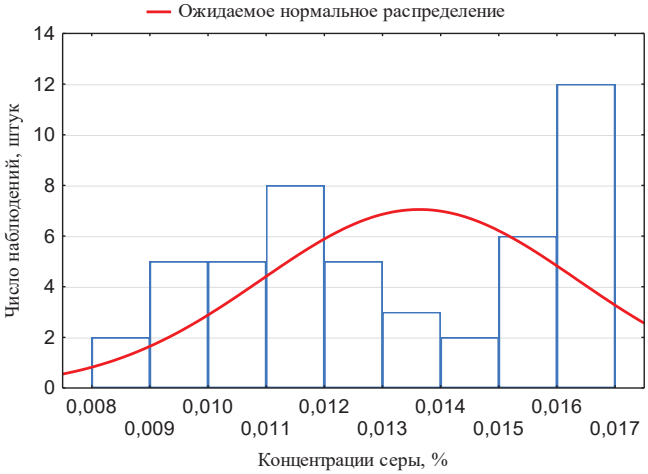


Рисунок 3.25. Гистограмма концентраций серы в анализируемых плавках

Плавки с высокими показателями KCV^{-60} имели основность от 2,2 до 2,5 единиц, что сопоставимо с предыдущими плавками. Вместе с тем шлаки этих плавок рассыпались в порошок белого цвета. Это объяснялось тем, что содержания FeO в них были меньше 1% и колебались от 0,4 до 0,7%, что и обусловило их белизну (рис. 3.26). Кроме того, содержание серы в них было ближе к нижнему пределу от 0,009 до 0,013%.



Рисунок 3.26. Шлак после диффузионного раскисления, рассыпающийся в порошок белого цвета с концентрацией FeO меньше 1%

Исследовали нетравленые микрошлифы, изготовленные из остатков ударных образцов. Характерные микроструктуры сталей с KCV^{-60} от 200 до 230 кДж/м^2 представлены на рис. 3.27, 3.28.

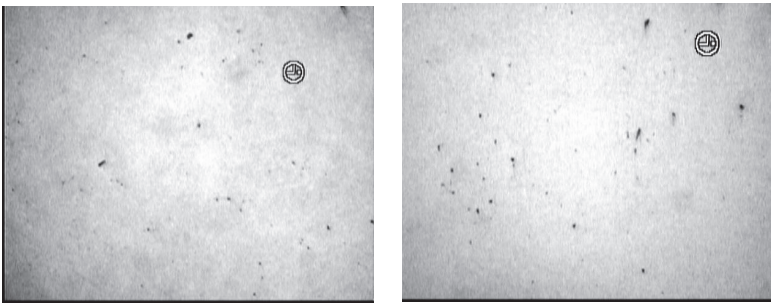
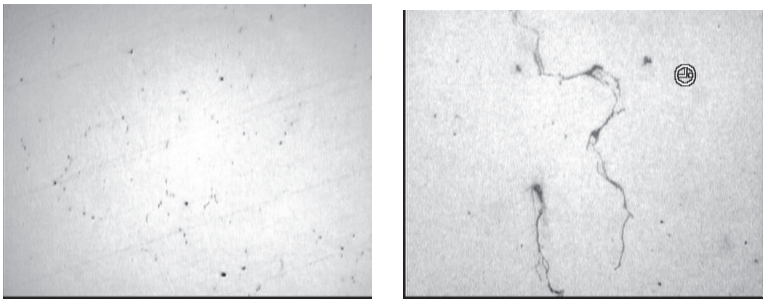


Рисунок 3.27. Мелкие оксидные включения на границах зерен ×100



×100 ×500

Рисунок 3.28. Выделения сульфидов по границам зерен

Как видно из представленных рисунков, на микрошлифах видны мелкие включения оксидов, выпавших по границам зерен (рис. 3.27), чему способствовало повышенное содержание FeO в шлаке и, соответственно, в стали. Кроме того, на границах зерен видны выделения сульфидов, которые в отдельных местах провоцируют микротрещины в металле (рис. 3.28). Количество НВ в стали, посчитанных по ГОСТ 1778 (способ Л1), равнялось $1{,}74 \cdot 10^{-3}$.

Напротив, в сталях с KCV^{-60} от 380 до 500 кДж/м^2 сульфидные выделения по границам зерен отсутствуют. Оксидов в микроструктуре просматривается значительно меньше (рис. 3.29). На поле шлифа встречаются отдельные оксисульфиды. Загрязненность стали НВ, была существенно меньше и равнялась $1{,}35 \cdot 10^{-3}$.

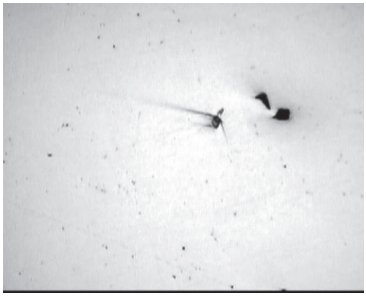


Рисунок 3.29. Отдельные оксисульфидные включения ×100

Исходя из результатов проведенного анализа для повышения KCV^{-60}, в стальных отливках необходимо снижать концентрации серы и кислорода в металле [238]. Для этого в ДСП с основной футеровкой необходимо повысить эффективности диффузионного раскисления стали.

Как указывалось ранее, до внедрения для проведения диффузионного раскисления на заводе применяли рафинирующую смесь следующего состава: ФС-65 с размерами частиц от 0,2 до 3 мм; коксовый орешек с кусочками до 8 мм и алюминиевые гранулы размерами до 25 мм. Количественное соотношение компонентов составляло 2:3:1. Смесь замешивалась сталеварами вручную непосредственно перед раскислением на стальной плите. Дозировку составляющих производили на глаз лопатами. Естественно, что составы смесей, приготовленные сталеварами, отличались друг от друга, что в сочетании, с крупными размерами составляющих смеси не обеспечивало стабильных результатов диффузионного раскисления стали. Расход смеси по нормам расхода составлял 4,24 кг на 1 т жидкой стали.

Для улучшения результатов диффузионного раскисления стали применили раскислитель диффузионный РДА, эффективность которого теоретически доказана в главе 2.

Рациональную присадку РДА определили экспериментально. Выбрали способ с наименьшей трудоемкостью определения эффективности раскисления по цвету шлака, который является индикатором качества металла. Эксперименты проводили на плавке № 8/1037. Завалка в печи составляла 7,5 тонны. После скачивания окислительного шлака наводили новый высокоосновный шлак (B>2) для чего отдавали в печь известняк из расчета 40 кг/т и плавиковый шпат 4 кг/т металлозавалки. Диффузионное раскисление проводили по методике, подробно описанной в параграфе 3.1.1. Плавка № 1200032. Количество присаживаемого РДА увеличивали от 6 до 24 кг на плавку. Экспериментально установили рациональную присадку РДА, равную 18 кг на плавку, или 2,4 кг на одну тонну жидкой стали. После окончания присадок РДА и реакций раскисления визуально шлак был жидкоподвижным и реакционноспособным. Изменения шлаков плавки № 8/1037 в процессе экспериментов приведены на рис. 3.30 и в табл. 3.14.



а



б



в



г

Рисунок 3.30. Динамика изменения цвета шлаков в процессе раскисления:
а — шлак до присадок РДА; б — шлак после обработки 6 кг РДА;
в — шлак после обработки 12 кг РДА;
г — шлак после обработки 18 и 24 кг РДА

Таблица 3.14

Результаты химического анализа шлаков плавки 8/1037

№ пробы	Химический состав шлаков, %							Концентрация серы в расплаве, %
	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	Осн.	
До обработки РДА	4,8	24.2	1,9	57,1	4,9	9,3	2,35	0,031
Обработка 6 кг РДА	1,9	25,1	1,7	57,7	6,3	4,8	2,3	0,021
Обработка 12кг РДА	0,79	25,3	1,9	57,6	6,1	2,2	2,28	0,013
Обработка 18 кг РДА	0,42	26,1	2,2	61,8	5,3	1,1	2,37	0,0079
Обработка 24 кг РДА	0,4	26,3	2,3	60,5	6,3	1,1	2,3	0,0076

Как видно из табл. 3.14, до обработки РДА шлак содержал большое количество FeO (4,8%) и MnO (9,3%), что и обусловило черный цвет шлака (рис. 3.30а). После обработки шлака РДА содержание FeO и MnO в шлаке начало резко снижаться, что свидетельствует о высокой эффективности РДА. Как видно из данных табл. 3.14, концентрации FeO в шлаке в конечном итоге снизились с 4,8 до 0,4%, то есть на 91,7%, а MnO с 9,3 до 1,1% на 90,1%, что ведет к экономии марганецсодержащих ферросплавов. Кроме того, снижение концентрации FeO в шлаках положительно сказалось на процессе десульфурации расплава по реакции (2.33) [210]. Известно, что для успешной десульфурации стали по реакции (2.33) необходимы высокие основность, жидкоподвижность и реакционная способность шлаков, а также высокая температура процесса и низкая концентрация FeO в шлаке [210]. Все эти условия создало применение РДА в качестве диффузионного раскислителя. Это хорошо демонстрирует динамика снижения серы после возрастающих присадок РДА на шлак. Концентрация серы в расплаве в конечном итоге снизилась на 75% с 0,031 до 0, 0076.

Химический состав и механические свойства стали анализируемой плавки соответствовали требованиям НТД (табл. 3.15, 3.16). KCV^{-60} достигло значения 356 кДж/м^2 и превысило требуемый по ГОСТ 32400 уровень на 43,8%.

Таблица 3.15

Химический состав стали плавки 8/1048

Замер	Химический состав, % по массе										
	C	Mn	Si	V	Al	S	P	Cr	Ni	Cu	Ca
Окончательн.	0,217	1,250	0,39	0,07	0,028	0,008	0,017	0,103	0,096	0,164	0,0029

Таблица 3.16

Механические свойства стали плавки 8/1048

№ пп	Наименование механических свойств		Значение по ГОСТ 32400-2013, не менее	Фактические значения
1	σ_B	МПа	510	560
2	σ_T	МПа	343	385
3	δ	%	18	22,5
4	Ψ	%	30	41
5	$KCV^{-60°}$	кДж/м^2	200	356

Затем на разных печах провели пять экспериментальных плавок с использованием рационального количества диффузионного раскислителя РДА равного 18 кг (6 пакетов). Раскисление шлака РДА производили после наведения высокоосновного шлака. Раскислитель отдавали на шлак 3 раза частями по 6 кг (2 пакета). Каждые последующие порции РДА отдавали в печь после прекращения реакции от предыдущей подачи. После окончания раскисления шлаки были жидкоподвижные и после остывания рассыпались в белый порошок, что свидетельствовало об эффективно проведенном раскислении. Химический состав и механические свойства экспериментальных плавок приведены в табл. 3.17, 3.18.

Таблица 3.17

Химический состав сталей экспериментальных плавок с применением РДА

№ плавки	C	Mn	Si	V	Al	S	P	Cr	Ni	Cu
8–309	0,21	1,11	0,31	0,065	0,026	0,0102	0,021	0,1	0,11	0,12
10–338	0,20	1,17	0,39	0,062	0,033	0,0098	0,0142	0,093	0,088	0,115
9–160	0,19	1,25	0,4	0,054	0,037	0,0101	0,014	0,06	0,08	0,110,
8–3085	0,19	1,25	0,43	0,062	0,033	0,009	0,011	0,07	0,1	0,12
10–336	0,20	1,25	0,34	0,0724	0,0314	0,0125	0,0182	0,211	0,084	0,101
Среднее значение	**0,198**	**1,206**	**0,37**	0,063	**0,032**	**0,0103**	**0,0157**	**0,107**	**0,092**	**0,091**

Таблица 3.18

Механические свойства экспериментальных плавок с применением РДА

№ плавки	σ_B, МПа	σ_T, МПа	δ, %	Ψ, %	KCV^{-60}, кДж/м^2
8–309	510	345	24,5	47	375
10–338	520	345	26	50	313
9–160	510	350	27	48	400
8–3085	520	345	29	54	443
10–336	540	355	26	49	342
Среднее значение	520	348	26,5	49,6	**374,6**

Данных табл. 3.13 и 3.17 показывают, что среднее значение концентрации серы в расплаве снизились с 0,0136 до 0,0103%, то есть на 24,3%.

Соответственно, это сказалось и на механических свойствах стали. При новой технологии средние значения KCV^{-60} выросли с 299,9 до 374,6 кДж/м^2, то есть на 20%. Очень важно, что все значения KCV^{-60} экспериментальных плавок (табл. 3.17) были выше среднего значения KCV^{-60} (табл. 3.13). Результаты экспериментов доказали эффективность действия нового материала РДА и подтвердили теоретические предпосылки. В процессе работы установлено, что РДА за счет рационального подбора компонентов и их дисперсности раскисляет шлак значительно быстрее и эффективнее, чем заводская смесь. Время восстановительного периода уменьшилось на 15 минут [210, 18].

Рассчитали экономию электроэнергии от уменьшения времени плавки. На печи ДСП 6 используется трансформатор ЭЦТП-10000/10-УХЛ4 с номинальной мощностью 5000 кВа. Восстановительный период ведется на 9-й ступени с мощностью 2887 кВа. Экономия электроэнергии за 15 минут работы печи составит 2887/60·15=722 кВт на одну плавку, или 96,2 кВт/т. При цене 1 кВт, равной 5 рублей, экономия составит 3610 рублей на одну плавку, или 481 руб/т.

Уменьшился также и расход РДА по сравнению с заводской смесью на 40% с 4,24 до 2,37 кг/т жидкого. Кроме того, выявили, что РДА легко вписывается в технологический процесс плавки вместо смеси, применяемой на заводе. РДА исключает трудоемкий ручной труд сталеваров по приготовлению, применяемой ранее смеси. РДА поставляется на завод готовой к применению в пакетированном виде весом по 3 кг. Это дает возможность сталеварам при присадке смеси равномерно распределять ее по всему периметру ванны печи, а также контролировать потребление РДА в соответствии с нормами расхода [210, 18]. Вышесказанное дало возможность внедрить РДА в технологический процесс плавки.

Отливки разработанной конструкции «балка надрессорная», отлитые по разработанной технологии, успешно прошли расширенные испытания на стендах. После испытаний и детального изучения отливок с порезкой в проблемных местах, дефектов усадочного происхождения не обнаружено, что свидетельствует об эффективности проведенного моделирования. Новая «балка надрессорная» рекомендована ВНИИЖТ к использованию в инновационных тележках грузоподъемностью 25 тс. Сертификат соответствия балки прилагается.

3.2.2. При производстве отливок «рама боковая» и «балка надрессорная» из стали 20ГЛ в электродуговых печах «ВКМ-Сталь»

Отливки «балка надрессорная» и «рама боковая» производит ООО «ВКМ-Сталь». На заводе их отливают из стали 20ГЛ**.** Требования к

отливкам «балка надрессорная» и «рама боковая» регламентирует ГОСТ 32400. Они приведены в табл. 1.1, 3.12.

Плавка стали в ООО «ВКМ-Сталь» ведется в дуговых печах с основной футеровкой. На заводе используются печи как постоянного тока ДПС-12 №№ 2 и 3, так и переменного тока ДСП-16 № 1. Общеизвестно, что в настоящее время вопрос выбора типа плавильных печей является дискуссионным. В сталеварении ведется так называемое соревнование дуговых печей постоянного (ДППТ) и переменного тока (ДСП) [211]. Много фундаментальных работ посвящены изучению преимуществ и недостатков этих печей. Досконально изучены технологические, энергетические, экологические параметры печей, которые отражаются на их технико-экономических показателях [212, 213, 214]. Вместе с тем сравнению качественных показателей сталей, выплавленных в различных типах печей, не уделялось должного внимания, хотя это очень важный аспект производства отливок ответственного назначения.

На заводе с 2006 года работают дуговые сталеплавильные печи постоянного тока ДПС-12 вместимостью 12 тонн. Производственно-инжиниринговая компания ООО «НПФ КОМТЕРМ» провела аудит, который показал [215], что-в существующем состоянии, печи работают с показателями, более высокими, чем большинство дуговых сталеплавильных печей в литейных производствах РФ и на уровне средних показателей европейских литейных производств.

Наряду с этим «ВКМ-Сталь» завершило этап модернизации производства запуском современной электродуговой сталеплавильной печи переменного тока ДСП-16 вместимостью 16 т производства компании Thermomelt (Италия) [216]. Основным отличием печи является увеличенная мощность трансформатора 12500 кВА и наличие системы инжекции кислородоугольной смеси. В результате продолжительность плавки уменьшается на 30-40% и становится сопоставимой с временем плавки в печи постоянного тока. Кроме того, ДСП-16 оснащена системой автоматического дозирования подачи ферросплавов, что минимизирует ручной труд сталеваров и позволяет повысить точность химического состава жидкой стали по легирующим элементам и приблизиться по этому показателю в печах постоянного тока. Используемый на печи водоохлаждаемый свод требует минимум ремонтов и помогает снизить расход огнеупорных материалов до сопоставимого с печью постоянного тока. **Учитывая вышесказанное, представилась уникальная возможность сравнить качественные показатели стали 20ГЛ для ответственных железнодорожных отливок «балка надрессорная» и «рама боковая» достигаемых при выплавке в печах постоянного и переменного токов**.

Плавки проводили в ноябре 2023 года. Для выплавки стали в печах постоянного и переменного тока применялись однотипные шихтовые материалы. Они в основном состояли из лома углеродистой стали 2А, возврата собственного производства, а также ферросплавов: ферромарганца ФМн78,

ФМн88, ферросилиция ФС45. Для раскисления стали применяют технический алюминий. В окислительный период на печах используют продувку кислородом. Заливку форм производили из стопорного ковша вместимостью 16 тонн. Температура заливки составляла 1560–1590 °С.

Задачу сравнения качественных показателей стали решали статистической обработкой и регрессионным анализом представленных данных. Были обработаны результаты анализов образцов стали 20ГЛ 51 плавки печи переменного тока № 1, а также 31 и 22 плавок, выплавленных в печах постоянного тока №№ 2 и 3, что достаточно для объективной оценки технологического процесса плавки и сравнения качества стали, выплавленных в различных печах. Определяли средние арифметические значения концентраций химических элементов в металле, механических свойств стали, температуры заливки, а также показатели вариаций средних величин, характеризующих их стабильность.

При выплавке стали на заводе были проблемы. В отдельных плавках важнейший показатель механических свойств KCV^{-60} оказывался ниже требуемого ГОСТ значения, равного 200 кДж/м^2. Этому сопутствовало повышенное содержание серы в расплаве выше допустимого >0,02%. Вредное влияние S на механические свойства стали бесспорно. Для ее успешного удаления на заводе, учитывая опыт Рубцовского филиала АО «Алтайвагон», взамен раскислительной смеси, используемой ранее на заводе и состоящей из дробленных коксика, ФС65 и алюминиевой крупки, внедрили технологический процесс, обеспечивающий более эффективное диффузионное раскисление стали с применением РДА в количестве 3 кг на 1 т жидкой стали. Это способствовало снижению концентрации S в металле и повышению механических свойств стали.

Провели статистическую обработку и регрессионный анализ результатов плавок, выплавленных в печи переменного тока № 1. Результаты статистической обработки приведены в табл. 3.19.

Таблица 3.19

Результаты статистической обработки результатов плавок, выплавленных в печи переменного тока № 1

Переменные	ВКМ сталь 1 печь						
	Кол. плавок	Среднее значение	Минимум	Максимум	Дисперсия	Ср. кв. отклонение	Коэф. вариации, V, %
C, %	51	0,215	0,190	0,250	0,0003	0,01592	7,41429
Mn, %	51	1,195	1,080	1,410	0,0070	0,08372	7,00666
Si, %	51	0,387	0,300	0,570	0,0029	0,05399	13,93575
P, %	51	0,019	0,015	0,024	0,0000	0,00209	11,28713
Cr, %	51	0,161	0,080	0,370	0,0050	0,07055	43,93376
Ni, %	51	0,091	0,060	0,140	0,0003	0,01746	19,19624
Cu, %	51	0,103	0,080	0,150	0,0003	0,01657	16,03846
S, %	51	0,015	0,010	0,020	0,00001	0,00253	17,05057

Переменные	ВКМ сталь 1 печь						
	Кол. плавок	Среднее значение	Минимум	Максимум	Дисперсия	Ср. кв. отклонение	Коэф. вариации, V, %
Al, %	51	0,038	0,027	0,060	0,0001	0,00757	19,94351
$\sigma_{ТЕК}$	51	352,667	309,000	400,000	739,7867	27,19902	7,71239
$\sigma_{В}$	51	530,863	502,000	580,000	455,6808	21,34668	4,02113
δ, %	51	25,373	20,000	32,000	9,0384	3,00640	11,84902
Ψ, %	51	52,961	36,000	64,000	54,1184	7,35652	13,89051
KCV^{-60}, кДж/м^2	51	216,098	202,000	233,000	77,4902	8,80285	4,07355
Тзал.°С	51	1575,471	1563,000	1591,000	35,6141	5,96776	0,37879

Изучили показатели, которые во многом зависят от мастерства сталеваров. Это температура выпуска металла, начала и окончания заливки стали, а также концентрации основных элементов, определяющих качество стали, которые обеспечивают сталевары во время выплавки добавками ферросплавов по результатам расчетов.

Как видно из данных табл. 3.19, что по величине коэффициента вариации наиболее стабильна температура начала заливки стали (V=0,378%). Это подтверждает и гистограмма распределения температур, изображенная на рис. 3.31.

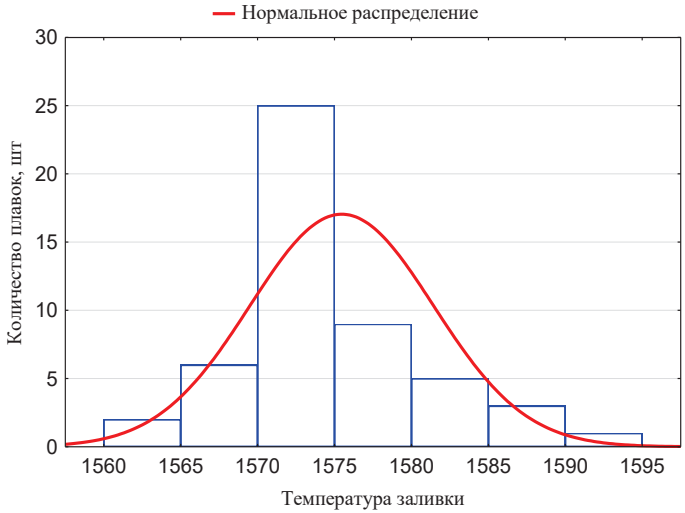


Рисунок 3.31. Температура начала заливки стали

Гистограмма показывает, что распределение температур стремится к нормальному, что свидетельствует о стабильности процесса заливки и дает возможность успешно бороться с браком по пригару, неспаям и недоливам.

Концентрации основных элементов, определяющих качество стали, которые обеспечивают сталевары во время выплавки добавками ферросплавов по расчету, достаточно хорошо согласуются с требованиями ГОСТ 32400 и отличаются высокой стабильностью (у C, Mn, Si: соответственно, V=7,41429; 7,00666 и 13,93575%, табл. 3.18).

Наглядно распределение содержания Mn представлено на гистограмме (рис. 3.32). На примере марганца видно, что распределение его концентраций стремится к нормальному, что свидетельствует о высокой однородности элемента, в анализируемых плавках стали. Концентрации углерода и кремния удовлетворяют требованиям ГОСТ 32400 и находятся в допустимых пределах (C=0,19–0,25; Si=0,3–0,57%).

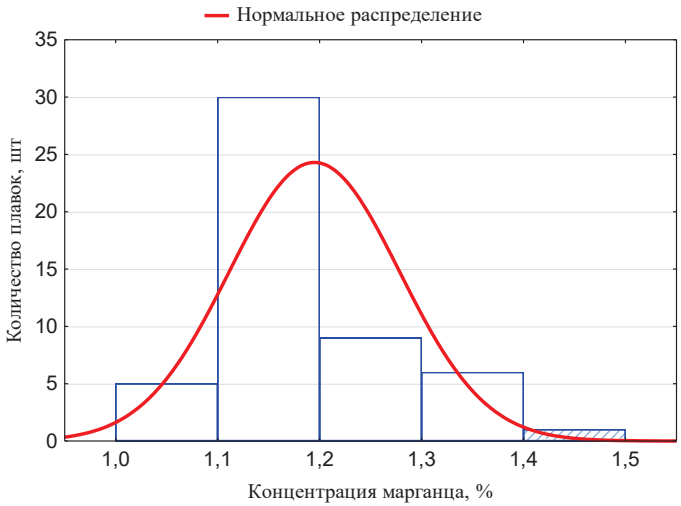


Рисунок 3.32. Гистограмма концентраций марганца

Вредное влияние P и S общеизвестно. Они оказывают большое отрицательное влияние на механические свойства стали и особенно на KCV^{-60}. Среднее содержание P в сталях, равное 0,019% с V=11,28% (табл. 3.18), удовлетворяет требованиям ГОСТ32400 (P≤0,02%). Это свидетельствует об удовлетворительном проведении сталеварами окислительных периодов плавок.

Среднее содержание серы в анализируемых плавках стали равное 0,015% существенно ниже требуемого ГОСТ 32400 (0,02%).

На гистограмме концентраций серы (рис. 3.23) видно, что содержание серы в анализируемых плавках стали стабильно и стремится к нормальному распределению, но ближе к меньшим значениям. Это свидетельствует об удовлетворительном проведении сталеварами восстановительных периодов плавок и высоком качестве РДА.

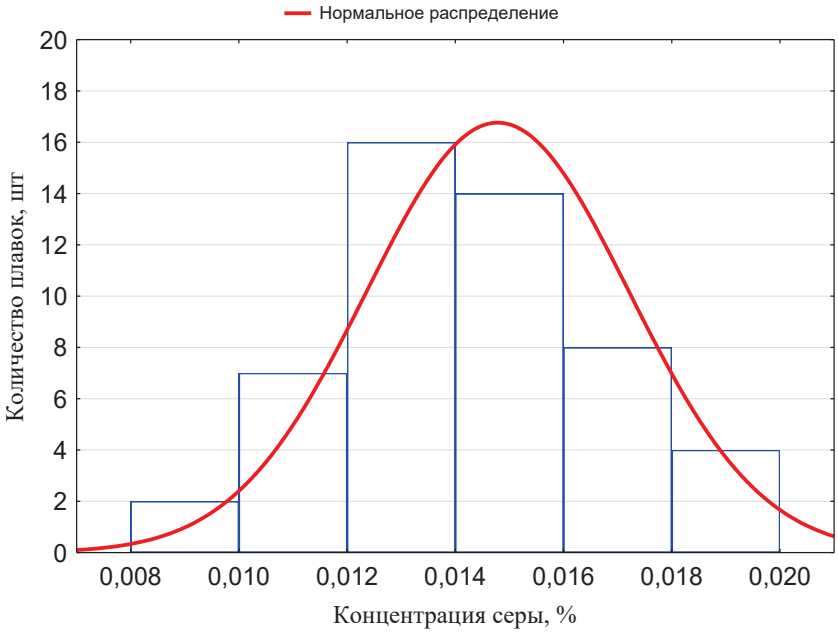


Рисунок 3.23. Гистограмма концентраций серы

Большое влияние на качество стали оказывают шихтовые материалы, которые содержат примеси, концентрации которых не могут изменить сталевары в процессе выплавки. К ним относятся Cr, Ni и Cu. Если Ni может оказать положительное влияние на механические свойства, то Cr и Cu отрицательное. Как видно из данных табл. 1.1 и 3.18 средние концентрации Cu и Ni, равные 0,103 и 0,091%, удовлетворяют требованиям ГОСТ 32400, и максимальные значения содержаний этих элементов (0,103 и 0,14%) также находятся в допустимом диапазоне концентраций. А вот концентрация Cr в плавках в среднем (0,161%) удовлетворяет требованиям ГОСТ 32400, но максимальные значения концентраций Cr (0,37%) превышают допустимое значение. Как видно из табл. 3.18 и гистограммы (рис. 3.24), содержание хрома в плавках не стабильно (V=43,93376). 5% плавок содержат хрома больше 0,3%. Вместе с тем 64% плавок имеют концентрации хрома близко к среднему значению равному 0,16%. Окончательный вывод о влиянии примесей на механические свойства сталей и качестве шихтовых материалов можно сделать после регрессионного анализа зависимости механических свойств от химического состава и температуры заливки стали.

Произвели анализ механических свойств образцов стали, выплавленной в печи № 1. Как видно из данных табл. 3.18, прочностные характеристики механических свойств σ_T и σ_B достаточно стабильны (V=7,7 и 4,02%). Средние значения 352,66 и 530,86 МПа соответствуют требованиям ГОСТ 32400.

Минимальные значения σ_T=309 МПа и σ_B=502 МПа соответствуют первой категории механических свойств, 19,6% плавок имеют значения σ_B меньше 510 МПа. Пластические характеристики механических свойств стали δ и Ψ менее стабильны (V=11,84902 и 13,89051% соответственно). Значения их соответствуют первой категории механических свойств по ГОСТ 32400.

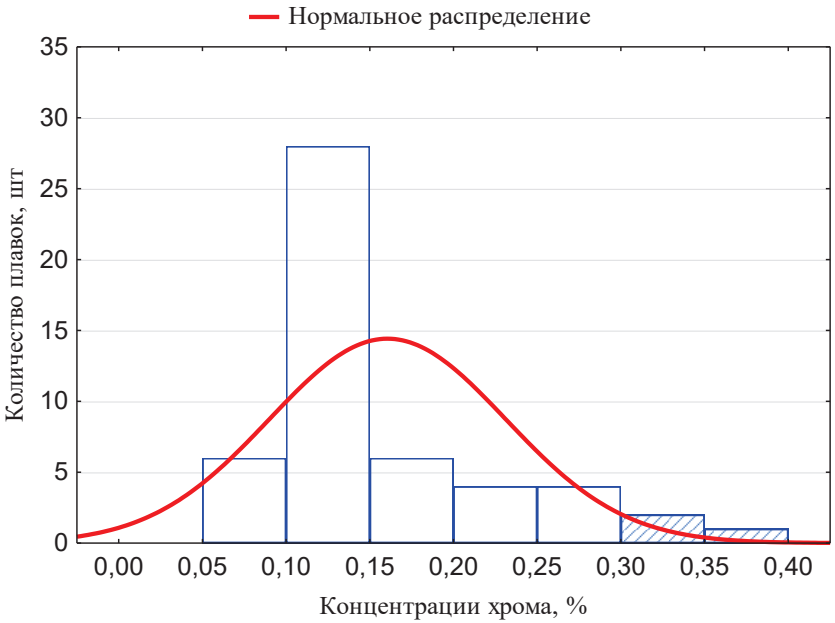


Рисунок 3.24. Гистограмма концентраций хрома

Наиболее важный показатель механических свойств, особо структурно зависящая ударная вязкость с острым надрезом при температурах –60 °С, как следует из данных табл. 3.18, отличается высокой стабильностью (V=4,07%). Средние и минимальные значения ударной вязкости соответствуют требованиям ГОСТ32400.

Для определения степени влияния химических элементов в стали и температур заливки на KCV^{-60} стали провели регрессионный анализ. Вычислили коэффициенты регрессии множественной линейной зависимости KCV^{-60} от состава металла и температуры заливки его в формы.

Основные результаты вычислений коэффициентов регрессии, определяющих влияние переменных на KCV^{-60}, приведены в табл. 3.20.

Таблица 3.20

Коэффициенты регрессии линейной зависимости KCV^{-60} от указанных параметров

N=51	ВКМ сталь 1 печь					
	Стандартная оценка	Ср. кв. отклонение стандартной оценки	Коэф. регрессии	Средне кв. отклонение коэф. регрессии	t-критерий	p-уровень значимости коэффициента регрессии
Св. член			83,532	372,3577	0,22433	**0,823700**
C, %	–0,029415	0,152600	–16,266	84,3850	0,19276	**0,848176**
Mn, %	–0,097256	0,172029	–10,226	18,0876	0,56535	**0,575161**
Si, %	0,055774	0,152051	9,093	24,7893	0,36681	**0,715793**
P, %	0,036982	0,173790	155,658	731,4823	0,21280	**0,832622**
Cr, %	0,255316	0,202156	31,856	25,2231	1,26297	**0,214296**
Ni, %	–0,326879	0,233671	–164,758	117,7779	1,39889	**0,169956**
Cu, %	0,324307	0,224032	172,257	118,9955	1,44759	**0,155932**
S, %	–0,104644	0,158466	–364,457	551,9127	0,66035	**0,513010**
Al, %	–0,226361	0,165389	–263,337	192,4050	1,36866	**0,179143**
T зал.,°C	–0,184860	0,225288	–0,273	0,3323	0,82055	**0,417020**

О степени влияния переменных показателей на KCV^{-60} можно судить по t-критерию. Но проще всего и нагляднее влияние изучаемых показателей характеризует уровень значимости коэффициентов регрессии (p). Его нужно сравнивать с принятым статистическим уровнем значимости, равным 0,05. Как видно из данных табл. 3.20, содержания C, Si, Mn, P, S и Al в пределах концентраций, достигнутых на заводе сталеварами, а также температуры заливки, выдерживаемые сталеварами, практически не влияют на величину KCV^{-60}, так как уровень значимости их коэффициентов (**p**) существенно выше принятого для расчетов уровня значимости 0,05.

Концентрации Cr, Ni, Cu, обусловленные применяемыми на заводе шихтовыми материалами, также практически мало влияют на величину KCV^{-60} так как уровень значимости их коэффициентов в уравнении регрессии (**p**) существенно выше принятого для расчетов уровня значимости 0,05. Это свидетельствует о том, что применяемые на заводе шихтовые материалы обладают удовлетворительным качеством и обеспечивают требуемый уровень механических свойств выплавляемых сталей на печи переменного тока.

Произвели статистический анализ результатов представленных плавок, выплавленных в печах №№ 2 и 3 постоянного тока. Результаты статистического анализа 31 плавки, выплавленной в ноябре 2023 года на печи № 2, представлены в табл. 3.21, а на печи № 3 — в табл. 3.22.

Таблица 3.21

Результаты статистической обработки результатов плавок, выплавленных в печи № 2

Переменные	ВКМ-Сталь 2 печь						
	Кол. плавок	Среднее значение	Минимум	Максимум	Дисперсия	Ср. кв. отклонение	Коэф. вариации, V, %
C, %	31	0,212	0,160	0,250	0,0003	0,01734	8,19379
Mn, %	31	1,166	1,060	1,330	0,0039	0,06217	5,33283
Si, %	31	0,390	0,320	0,470	0,0018	0,04239	10,85918
P, %	31	0,018	0,015	0,022	0,0000	0,00181	10,14186
Cr, %	31	0,183	0,110	0,480	0,0047	0,06837	37,38109
Ni, %	31	0,087	0,060	0,140	0,0006	0,02358	27,17147
Cu, %	31	0,096	0,080	0,110	0,0001	0,00720	7,51428
S, %	31	0,013	0,008	0,018	0,0000	0,00231	17,56164
Al, %	31	0,043	0,028	0,056	0,0000	0,00699	16,42765
$\sigma_{ТЕК}$	31	354,742	303,000	400,000	754,9978	27,47722	7,74569
$\sigma_{В}$	31	532,032	504,000	582,000	313,8989	17,71719	3,33010
δ, %	31	25,484	20,000	32,000	7,9914	2,82691	11,09292
Ψ, %	31	55,645	42,000	64,000	28,4366	5,33259	9,58321
KCV^{-60}, кДж/м^2	31	217,194	202,000	235,000	73,7613	8,58844	3,95428
Тзал.°С	31	1574,742	1565,000	1594,000	63,1978	7,94971	0,50483

Таблица 3.22

Результаты статистической обработки результатов плавок, выплавленных в печи № 3

Переменные	ВКМ-Сталь 3 печь						
	Кол. плавок	Среднее значение	Минимум	Максимум	Дисперсия	Ср. кв. отклонение	Коэф. вариации, V, %
C, %	21	0,209	0,190	0,250	0,000	0,01374	6,57373
Mn, %	21	1,159	1,070	1,330	0,004	0,06074	5,24030
Si, %	21	0,395	0,330	0,490	0,002	0,04118	10,43283
P, %	21	0,018	0,014	0,024	0,000	0,00230	12,94964
Cr, %	21	0,151	0,110	0,250	0,001	0,03192	21,14741
Ni, %	21	0,093	0,070	0,140	0,000	0,01494	16,01179
Cu, %	21	0,107	0,080	0,140	0,000	0,01560	14,62420
S, %	21	0,015	0,010	0,021	0,000	0,00322	21,51344
Al, %	21	0,042	0,032	0,053	0,000	0,00563	13,53828
$\sigma_{ТЕК}$	21	348,238	308,000	494,000	2765,990	52,59268	15,10251
$\sigma_{В}$	21	521,048	502,000	566,000	344,048	18,54852	3,55985

Переменные	ВКМ-Сталь 3 печь						
	Кол. плавок	Среднее значение	Минимум	Максимум	Дисперсия	Ср. кв. отклонение	Коэф. вариации, V, %
δ, %	21	24,667	18,000	32,000	14,533	3,81226	15,45511
Ψ, %	21	49,381	28,000	64,000	86,248	9,28696	18,80676
KCV^{-60}, кДж/м^2	21	214,476	193,000	240,000	107,362	10,36156	4,83110
Тзал.°С	21	1572,429	1540,000	1584,000	76,857	8,76682	0,55753

Сравнили результаты статистической обработки качественных показателей стали выплавленных в печах постоянного тока №№ 2 и 3. Данные табл. 3.21 и 3.22 свидетельствуют, что результаты химического анализа, механических свойств и температур заливок сопоставимы по всем параметрам. Сравнивая данные табл. 3.21 и 3.22 с результатами, представленными в табл. 3.19, видно, что качественные показатели печей постоянного тока сопоставимы не только между собой, но и с результатами, полученными при выплавке стали в печи переменного тока № 1. Например, из данных табл. 3.21, 3.22 и 3.19 видно, что очень близки друг к другу средние температуры начала заливки стали (1575, 1574 и 1572 °С). Они и наиболее стабильны (V=0,37; 0,50 и 0,56%). Также сопоставимы все другие показатели качества.

Насколько близки качественные показатели сталей, выплавленных в различных печах, определили с помощью проверки гипотез о равенстве средних величин по t-критерию. Для примера сравнили попарно ударные вязкости KCV^{-60} для печей 1 и 2. Результаты приведены в табл. 3.23.

Таблица 3.23

T-test для независимых переменных KCV^{-60} для печей 1 и 2

Печи 1 и 2	Количество плавок, печь 1	Количество плавок, печь 2	Среднее значение, печь 1	Среднее значение, печь 2	Степень свободы	t-критерий	p — вероятность, с которой гипотеза о неравенстве средних отвергается
KCV1п.1 KCV1п.2	51	31	216,09	217,19	80	0,55	0,58

Как видно из данных табл. 3.23, вероятность, с которой гипотеза о неравенстве средних отвергается, существенно превышает выбранный уровень значимости 0,05. На этом основании можно сделать вывод о том, что нет существенных различий в показателях KCV^{-60} стали выплавленных в печах 1 и 2. Они статистически неразличимы.

Тестирование по t-критерию показало, что нет существенных различий у KCV^{-60} стали, выплавленных в печах №№ 1 и 3, а также в печах №№ 2 и 3. Кроме того, расчеты показали, что нет существенных различий в концентрациях серы и во всех других показателях качества стали, выплавленных в печах постоянного и переменного тока.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Печи постоянного и переменного тока позволяют стабильно получать:

1.1. Концентрацию основных химических элементов, удовлетворяющую требованиям ГОСТ 32400, с близкими друг к другу значениями.

1.2. Требуемые и сопоставимые температуры заливки стали.

1.3. Сопоставимые высокие механические свойства стали 20ГЛ, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 32400, и обеспечивающие эксплуатационную надежность отливок «рама боковая» и «балка надрессорная».

2. Применяемые на заводе шихтовые материалы обладают удовлетворительным качеством и обеспечивают требуемый уровень механических свойств выплавляемых сталей на печах переменного и постоянного тока.

3. Диффузионный раскислитель РДА производства ООО «Металлург» СОАЛ одинаково эффективен как в печах постоянного, так и переменного тока.

Анализируя полученные результаты, можно сделать важный вывод, что впервые получены сравнительные качественные показатели сталей для ответственных отливок, выплавленных в печах постоянного и переменного тока, которые свидетельствуют о высокой сопоставимости показателей, дающих возможность обеспечивать эксплуатационную надежность отливок. Снят один из дискуссионных вопросов, стоящих при выборе типа печи.

Важно также, что разработанный диффузионный раскислитель РДА, который производится ООО «Металлург» СОАЛ одинаково эффективен как в печах постоянного, так и переменного тока.

3.3. Подтверждение преимуществ разработанных смесей перед традиционными раскислителями и модификаторами, применяемыми на предприятиях РФ

В сталелитейном цехе ПАО «Михайловский ГОК» изготавливают отливки конусов дробилок, футеровочных плит мельниц, зубьев ковшей экскаваторов и другие отливки из стали 110Г13Л. С целью повышения результативности рафинирования металла, снижения себестоимости стали, повышения механических свойств и эксплуатационной надежности отливок взамен модификатора L-Cast® 5.3 в завалке применили разжижитель шлака РШ в количестве 5 кг на одну тонну шихты. При диффузионном раскислении

взамен смеси коксика и ФС45 (6 кг/т) и L-Cast® 720Z (4 кг/т), учитывая результаты предыдущих исследований, применили диффузионный раскислитель алюмосодержащий (РДА) в количестве: 6 кг на 1 т жидкой стали.

В результате внедрения при сопоставимых химических составах плавок сталей при применении РШ и РДА основность шлака в среднем увеличилась с 1,01 до 1,2. Концентрации MnO и FeO в шлаках снизились с 4,01 и 0,99% до 3,34 и 0,59% соответственно. Микроструктура отливок после термобработки плавок с применением L-Cast® 5.3 и L-Cast® 720Z состояла из аустенита и незначительного количества мелких одиночных карбидов, не перешедших в твердый раствор внутри и по границам зерен (2-й балл). В микроструктуре отливок после термической обработки плавок с РШ и РДА присутствовали только аустенит и мелкие одиночные карбиды в зернах (1 балл). Благоприятная микроструктура оказала существенное влияние на уровень механических свойств. Ударная вязкость за счет применения разработанных материалов увеличилась с 2110 до 2500 кДж/м^2, то есть на 15,6%, что резко повышает эксплуатационную надежность отливок. Экономический эффект от замены материалов составил 111 рублей на одну тонну жидкого. Более подробно результативность внедрения разработанной технологии изложена в работах [241, 18].

ООО «БВК» производит ответственные отливки корпусных деталей трубопроводной арматуры высочайшего уровня качества для магистральных нефте- и газопроводов из стали 20ГЛ. В ДСП получают полупродукт стали. В АКП емкостью 20 тонн металл рафинируют и доводят по химическому составу и температуре до необходимого уровня. В ООО «БВК» отмечен редкий случай, когда в качестве диффузионного раскислителя применяют алюмошлаковые брикеты (АШБ). Сравнили результативность АШБ и РДА в условиях ООО «БВК».

Количество РДА по сравнению с АШБ было уменьшено в 2 раза с 3 до 1,5 кг/т в связи с более благоприятным компонентным составом и дисперсностью РДА, и, как следствие, высокой эффективностью РДА. Расход извести при использовании АШБ выше в среднем на 5,35 кг/т жидкого, чем при использовании РДА (56,11 против 50,76 кг соответственно). Это потребовалось для обеспечения надлежащей степени десульфурации, сопоставимой с применением РДА. Еще одно преимущество от применения РДА является увеличение концентрации кальция в металле на 35% (с 0,003188 до 0,04249%), также существенную ее стабилизацию. При этом обеспечивается лучшее соотношение Ca/Al с 0,07856 до 0,10572. Это важно для обеспечения минимума неметаллических включений в стали, улучшения их формы, повышения жидкотекучести расплава и увеличения механических свойств. Следовательно, трудоемкость десульфурации стали при использовании РДА ниже. Механические свойства стальных отливок, выплавленных с применением РДА, выше, чем при использовании АШБ. Подтвердилось также и снижение времени диффузионного раскисления на 33 минуты. Экономия электроэнергии составила (11000/60·33):22=275 кВт/т ж.

Наиболее структурно чувствительная величина KCV^{-60} увеличилась с 295,2 до 329,1 кДж/м^2, то есть на 10,2%. Это очень важно при эксплуатации изделий из литья в условиях Крайнего Севера. Более подробно с результатами можно познакомиться в работе [242].

Выводы по главе 3

1. Разработан и внедрен комбинированный способ выплавки стали 110Г13Л методом переплава при производстве ответственных железнодорожных отливок крестовины железнодорожные. Производственный процесс включает в себя комплексное воздействие трех последовательных стадий на процесс выплавки с использованием разработанных материалов: РШ для раннего наведения шлака; РДА во время диффузионного раскисления стали; РСА для внепечной обработки расплава.

2. В АО «Керченский металлургический завод» новая технология обеспечила:

– ранее наведение шлака с использованием РШ из расчета 5 кг на тонну шихты позволило уменьшить время плавления шихты от 9 до 15 минут и экономить электроэнергию от 749 до 1250 квт. Гарантировать низкий угар марганца во время плавления от 0,6 до 0,95%. Обеспечить концентрации MnO в шлаках от 14 до 18% и FeO от 0,9 до 1,2%;

– использование РДА во время диффузионного раскисления в количестве 6 кг на тонну жидкого позволило эффективно раскислить шлак. Шлаки имели основность ≥2 и рассыпались в белый порошок. Концентрации MnO в шлаках достигали от 4,5 до 6% и FeO от 0,9 до 1,2%.

– использование РСУ для внепечной обработки расплава в количестве 5 кг на тонну жидкого позволило достичь снижения концентрации MnO в шлаках от 4 до 5% и FeO от 0,35 до 0,45%;

– выявлено преимущества смесей РШ, РДА и РСУ, заключающееся в том, что они фасуются в пакеты по 3 и 10 кг, что облегчает точность дозирования и контроль за рациональным расходованием материала.

Архиважно, что разработанный способ выплавки стали 110Г13Л методом переплава с применением дисперсных смесей РШ, РДА и РСУ обеспечил высокие механические свойства стали, отвечающие требованиям 1 и 2-й групп, не уступающие механическим свойствам стали, выплавляемых с окислением, что подтвердило справедливость теоретических предпосылок, изложенных в главе 2.

Это дало возможность внедрить разработанную технологию в производство. Очень важно, что новый способ выплавки марганцовистой стали, выплавленной методом переплава наряду с повышением эксплуатационной надежности, позволил резко уменьшить себестоимость отливок, переплавить накопившийся на заводе возврат и получить годовой экономический эффект 48 млн рублей. Разработанный способ производства защищен патентом РФ № 2023121262, который зарегистрирован в Государственном реестре изобретений РФ **23 мая 2024 г.**

3. В АО «Муромский стрелочный завод» внедрение разработанного способа производства позволило увеличить количество плавок 1-й группы с 29,2 до 71% и резко увеличить эксплуатационную надежность «крестовин» и «стрелочных переводов».

4. Разработан способ диффузионного раскисления стали 20ГЛ с помощью дисперсного смесевого раскислителя РДА для повышения эксплуатационной надежности ответственных железнодорожных отливок «балка надрессорная» и «рама боковая»:

– В Рубцовском филиале АО «Алтайвагон» для повышения осевой нагрузки тележки на ось с 23,5 до 25,0 тс осуществили комплекс мер, которые включили в себя: совершенствование конструкции отливки «балка надрессорная»; разработка новой бездефектной технологии литейной формы с применением моделирования в программе Flow3D; совершенствование технологического процесса плавки для безусловного повышения эксплуатационной надежности отливки. Результаты экспериментов доказали эффективность действия нового материала РДА и подтвердили теоретические предпосылки. В процессе работы установлено, что РДА за счет рационального подбора компонентов и их дисперсности раскисляет шлак значительно быстрее и эффективнее, чем заводская смесь. Время восстановительного периода уменьшилось на 15 минут, среднее значение концентрации серы в расплаве снизилось с 0,0136 до 0,0103%, то есть на 24,3%. Средние значения KCV^{-60} выросли с 299,9 до 374,6 кДж/м^2, то есть на 20%. Экономия электроэнергии от уменьшения времени плавки составит 3610 рублей на одну плавку, или 481 руб/т. Уменьшился также и расход РДА по сравнению с заводской смесью на 40% с 4 до 2,4 кг/т жидкого. Кроме того, выявили, что РДА легко вписывается в технологический процесс плавки вместо смеси, применяемой на заводе. РДА исключает трудоемкий ручной труд сталеваров по приготовлению, применяемой ранее смеси. Это дало возможность внедрить РДА в технологический процесс плавки.

– В ООО «ВКМ-Сталь» с применением статистической обработки, регрессионного анализа и с помощью проверки гипотез о равенстве средних величин по t-критерию впервые получены сравнительные качественные показатели сталей для ответственных отливок, выплавленных в печах постоянного и переменного тока, которые свидетельствуют о высокой сопоставимости результатов выплавки сталей в тех и других печах. Это дало возможность снять один из дискуссионных вопросов, стоящих при выборе печей для выплавки стали. Установлено, что разработанный диффузионный раскислитель РДА, который производится ООО «Металлург» СОАЛ, одинаково эффективно обеспечивает требуемую эксплуатационную надежность отливок как при плавке стали как в печах постоянного, так и переменного тока.

5. В АО «Михайловский ГОК» при выплавке сталей 110Г13Л методом переплава разработанным способом подтверждены преимущества разработанных материалов перед традиционными. РШ с высокой

дисперсностью и более благоприятным компонентным составом по сравнению с L-Cast® 5.3 значительно быстрее формирует жидкоподвижный шлак. Время плавления в среднем уменьшилось на 10 минут. Экономия электроэнергии составила 833,3 кВт на плавку, или 104,2 кВт/тж. После расплавления шихты получался жидкоподвижный шлак. Использование РДА во время диффузионного раскисления взамен смеси коксика и ФС45 и L-Cast® 5.3 позволило снизить суммарное количество раскислителя с 10 до 6 кг/т, а также эффективно раскислить шлак и металл. Вспенивание шлака и экранизация дуг позволили сократить время восстановительного периода на 10 минут и экономить 59, 9 кВт/т ж. Эффективное диффузионное раскисление и использование РСУ взамен L-Cast® 720Z для внепечной обработки расплава в количестве 5 кг на тонну жидкого позволило увеличить основность шлаков с 0,90 до 1,19% или на 24%, снизить концентрации MnO в шлаках в среднем от 3,93 до 3,42%, то есть на 12,9% и FeO от 0,90 до 0,60%, то есть на 33%. Ударная вязкость стали увеличилась более на 11,6% с 2595,8 до 2896,5 кДж/м^2. Это позволило внедрить технологический процесс в производство и расширить номенклатуру ответственных отливок, выплавляемых разработанным способом.

6. Промышленные испытания дисперсного РДА в АКП В ООО «БВК» (г. Челябинск) при выплавке сталей для ответственного литья корпусных деталей трубопроводной арматуры подтвердили теоретические предпосылки и высокую эффективность РДА по сравнению с раскислителем АШБ, применяемым на заводе. Расход дисперсного РДА по сравнению с АШБ снизился в два раза с 3 до 1,5 кг/т жидкого. Время восстановительного периода уменьшилось на 33 минуты, что позволило экономить 275 кВт/т жидкого электроэнергии. Для обеспечения среднего содержания серы равным 0,0028% при использовании АШБ потребовалось на 5,35 кг/т извести больше, чем при использовании РДА. Экономия ФС65 составила 1,39 кг/т, а алюминия — 0,37 кг/т. Средние значения KCV^{-60} после внедрения РДА на отливках «клиновые задвижки» из стали 20Л выросли на 6,4% с 295,3 до 314,1 кДж/м^2, что очень важно при эксплуатации отливок в условиях Крайнего Севера.

7. На всех заводах отмечена более высокая технологичность РДА. Смесь легко вписывается в технологический процесс плавки. Она расфасована в пакеты, вес которых согласовывается с заказчиком, что снижает трудоемкость ручного труда сталеваров, уменьшает время плавки и обеспечивает контроль за рациональным расходованием материала.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В ПЕЧАХ С КИСЛОЙ ФУТЕРОВКОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПОСЫЛОК ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ОТЛИВОК ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

На основании теоретических предпосылок разработали и впервые дополнительно ввели в технологический процесс плавки в печах с кислой футеровкой диффузионное раскисление стали с применением дисперсных реагентов при производстве ответственных отливок для нужд машиностроения и железной дороги.

4.1. При производстве стальных отливок сельскохозяйственного назначения

В ООО «Ростовский литейный завод» производят стальные отливки для комбайнов и другой сельскохозяйственной техники из сталей 35Л, такие как тяги, вилки, картеры, кронштейны и еще целый ряд наименований. Вес отливок колеблется от одного д о 50 кг. Производимые отливки в основном относятся к первой группе качества. Поскольку при изготовлении отливок первой группы механические свойства не определяются, то в ходе исследований подтвердили теоретические предпосылки в части экономии ферросплавов, уменьшения времени плавки и экономии электроэнергии, повышении жидкотекучести стали, в обеспечении полноты разливки металла без остатков в ковше, устранения брака по неспаям, недоливам, повышения срока службы ковшей. Выплавку стали для производства отливок осуществляют в электродуговых печах с кислой футеровкой ДСП-3А и ДСП-5МТ. Химический состав сталей приведен в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Химический состав сталей

Марка стали	Массовая доля элементов, % по массе					
	C	Si	Mn	S	P	Ti
Сталь 35ТЛ	0,32–0,40	0,20–0,52	0,4–0,9	до 0,06		0,01–0,1

Температура стали перед выпуском должна быть 1630–1650 °С. Заливку форм производят при температурах 1540–160 °С. Если температура металла снижалась ниже 1540 °С, металл сливали в изложницы во избежание брака по неспаям и недоливам. Формы изготавливают из сырых песчано-глинистых смесей на встряхивающих с подпрессовкой машинах 703М.

Для решения поставленных задач в технологический процесс плавки было введено дополнительно диффузионное раскисление стали с использованием новых смесевых дисперсных раскислителей РД19П и РД21П,

для интенсификации процесса плавки. До внедрения использования РД восстановительный период плавки на заводе не проводили.

Было проведено четыре экспериментальных плавки (№ 768–771) с использованием вышеуказанных раскислителей. При проведении плавки № 768 анализировали возможность экономии ферросилиция и ферромарганца, снижения времени плавки и выявляли другие преимущества разрабатываемой технологии. Плавили сталь 35ТЛ. Завалка равнялась 4,5 тонны. Плавку стали вели с окислением. После расплавления шихты проводили рудное кипение. Шихтовые материалы рассчитывали таким образом, чтобы в период кипения окислилось 0,25% углерода. Кипение ванны способствовало удалению растворенных в металле газов и неметаллических включений. После окисления элементов до, %: C (0,35), Mn (0,10), Si (0,03) остановили кип присадкой ферросилиция и ферромарганца. После получения химического анализа пробы (C=0,37%, Mn=0,25% и Si=0,17%) начали нагревать металл и произвели поочередно диффузионное раскисление стали раскислительными смесями РД19П и РД21П. Определили рациональное количество присадки РД19П, для чего на шлак подали один пакет (3 кг) РД19П. Присадка РД19П, способствовала быстрому покрытию шлака равномерным слоем дисперсными составляющими смеси. Однако присадка одного пакета смеси оказалось недостаточной для полного покрытия шлака. Не хватило присадки и второго пакета (6 кг). Лишь после присадки третьего пакета (9 кг) шлак был полностью покрыт равномерным тонким слоем раскислителя. Таким образом, рациональным количеством РД19П оказалось 2 кг/т жидкого, что подтвердилось и другими исследованиями [244, 245]. После присадки на шлак рационального количества РД19П сразу же проявлялись благоприятные воздействия диффузионного раскисления на шлак, описанные в теоретических предпосылках. Шлак немедленно вспенивался за счет диссоциации карбонатов Ca, Sr и Na, находящихся в смеси. Выделяющийся газ способствовал перемешиванию шлака и замешиванию в него компонентов смеси. В области высоких температур в печи в присутствии твердого углерода, находящегося в составе РД19П, диоксид углерода превращался в монооксид [219]. В результате превращения количество газов резко возрастало, шлак высоко поднимался и полностью закрывал горящие дуги. При этом резко возрастал коэффициент использования тепла электрических дуг до 0,98 (табл. 1.8). Температура шлака быстро росла. Это способствовало разрушению прочных силикатных конгломератов шлака оксидами Ca, Na и Sr, образовавшимся во время диссоциации карбонатов. Это уменьшало кислотность шлака, делало его жидкоподвижным и, соответственно, существенно повышало его реакционные возможности. Оксиды Ca, Na и Sr вытесняли FeO и MnO из силикатных конгломератов Последние, в свою очередь, активно восстанавливались до Fe и Mn дисперсным УСМ, находящимся в смеси РД19П по реакциям 2.31. Реакции 2.31 способствовали дополнительному вспениванию шлака в результате выделения пузырьков CO. Таким образом, шлак постоянно находился во вспененном состоянии.

О полной экранизации электрических дуг свидетельствовало их стабильно тихое и равномерное гудение. Это позволяло интенсифицировать нагрев шлака и расплава. Уже через три минуты температура металла достигала 1590 °С. Таким образом, создались благоприятные условия для дальнейшей интенсификации восстановительного периода плавки и присадки на шлак РД21П. Установлено, что рациональное его количество также равнялось 2 кг/т жидкого [244, 245].

При подаче на шлак РД21П находящиеся в нем Al и C немедленно включались в восстановление FeO и MnO шлака по реакциям 2.31, 2.35. Восстановленные Fe и Mn диффундировали в расплав, а их оксиды, находящиеся в жидкой стали, по закону распределения переходили из расплава в шлак, где восстанавливались компонентами смеси. Смесь РД21П поддерживала шлак во вспененном состоянии. В результате в процессе восстановительного периода температура металла повышалась значительно быстрее, чем при обычной плавке, что привело к развитию эндотермических реакций 1.8–1.10 и уже через 5 минут температура была близка к температуре выпуска 1610 °С. В печь добавили ферромарганец ФМн78 и ферросилиций ФС45 для доводки металла по химическому составу согласно действующей на заводе инструкции и по существующим нормам расхода из расчета получения в стали концентраций, %: Mn (0,5) и Si (0,3). За счет вспенивания шлака и экранизации дуг металл нагрелся в печи до температуры выпуска 1650 °С на 10 минут раньше, чем в рядовых плавках. В результате уменьшилась продолжительность восстановительного периода и уменьшился расход электроэнергии.

Рассчитали экономию электроэнергии при сокращении времени плавки на 10 минут. На печи ДС-5МТ используется трансформатор ЭТМПК 4200/10. Плавка ведется на низких ступенях напряжения, обладающих самой высокой мощностью печного трансформатора, равной 2800 кВа.

Экономия электроэнергии составит:

$$Э_{10}=2800/60\cdot10=466,7 \text{ кВт·ч},$$

где 2800 номинальная мощность трансформатора в режиме плавления, кВа; 10 — время сокращения плавки, мин;

Экономический эффект от экономии электроэнергии на одну плавку составит:

$$466,7\cdot3,96=1848,13 \text{ руб.},$$

где 3,96 руб. — стоимость одного кВт электроэнергии.

Окончательный химический состав стали показал содержание, %: Mn (0,65) и Si (0,48). Это свидетельствовало о том, что хорошо раскисленный металл способствовал снижению угара марганца, а кремневосстановительный процесс привел к повышению содержания кремния в стали. Следовательно,

при использовании новой технологии за счет диффузионного раскисления и эндотермических реакций из шлака было восстановлено 0,15% марганца и 0,18% кремния, что позволило при внедрении экономить ферросплавы.

При проведении экспериментальных плавок отмечено, что при подаче смесей в печь шлак становится жидким и остается таким до конца плавки. В результате отпала необходимость присаживать в печь известняк, который раньше подавали для разжижения шлака. Высокая восстановительная способность раскислительных смесей хорошо прослеживалась на анализах шлаков. Шлаки отбирали для визуальной оценки качества и химического анализа после окончания окислительного периода и предварительного раскисления стали ФС45 и ФМн78 и перед выпуском по окончании реакций восстановления вызванных присадками смесей РД19П и РД21П. Результаты химического анализа шлаков приведены в табл. 4.2, а результаты визуальной оценки — на рис. 4.1, 4.2.

Таблица 4.2

Химический состав шлаков

№ плавки	Образец шлака	Химический состав шлаков, % по массе					
		SiO_2	CaO	MnO	FeO	MgO	Al_2O_3
768	Перед раскислением	49,8	8,7	16,9	14,2	2,4	4
	После раскисления	59,8	14,9	7,1	3,8	3,5	3,1

Как видно из табл. 4.2, шлак до раскисления содержал большое количество оксидов железа и марганца (14,2 и 16,9%) Это отразилось на цвете шлака. Поверхность пробы шлака была черного цвета. Черным шлак был и в изломе (рис. 4.1), что вызвано высоким содержанием в нем FeO и MnO.



Рисунок 4.1. Шлак до раскисления

После раскисления и разжижения в шлаке существенно снизились концентрации оксидов железа и марганца. FeO снизилось в 3,7 раза, с 14,2

до 3,8%, а MnO — в 2,3 раза, с 16,9 до 7,1%, а следовательно, снизились содержания этих оксидов в металле.

Шлак приобрел коричневую окраску с зеленым изломом (рис. 4.2), чему способствовали снижения концентраций оксидов железа и марганца. Таким образом, было установлено, что по цвету шлака можно косвенно судить о качестве раскисления шлака и металла.



Рисунок 4.2. Предвыпускной шлак после диффузионного раскисления

При температуре 1650 °С металл слили в пятитонный стопорный ковш. Разливку металла начали при температуре 1600 °С. При заливке форм из стопорного ковша шлак оставался слегка вспененным, чему способствовали мелкие пузыри CO, остающиеся в шлаке, ввиду того, что архимедова (подъемная) сила из-за их большой удельной поверхности оказывалась недостаточной для преодоления сопротивления (силы трения) шлакового расплава [106, 118]. Это подтверждено более низкой плотностью шлака, обработанного РД, по сравнению с обычными шлаками. Пробы шлака заливали в изложницы с формой усеченного конуса по ГОСТ 7565-81 [278] и определяли плотность образцов шлака. Плотность шлака рядовых плавок равнялся 2,95 г/см^3, а шлака, раскисленного РД — 2,71 г/см^3. Пенистый шлак, обладающий низкой плотностью, равномерно покрывал зеркало металла и опускался в ковше вместе с металлом. Одновременно с пониженной плотностью пенистый шлак обладал и низкой теплопроводностью [106, 118], что способствовало уменьшению теплопередачи от металла к атмосферному воздуху в ковше. Тепловые потери через слой шлака в ковше определяется по формуле.

$$Q = \frac{\lambda(t_1 - t_2)}{S} \cdot F \cdot \tau \,, \qquad (4.1)$$

где Q — тепловые потери через слой шлака в ковше, ккал/м^2·час;
λ — коэффициент теплопроводности, ккал/м·час·°С;
F — теплопроводящая поверхность, м^2;
$t_1 - t_2$ — температурный перепад,°С;

S — толщина слоя шлака;
τ — время, час.

Коэффициент теплопроводности спокойного, не перемешиваемого шлака в среднем составляет 3 Вт/(м К) [106]. У вспененного шлака λ уменьшилась в 2 раза до 1,5 Вт/(м К). Следовательно, в 2 раза уменьшились и теплопотери через шлак. Это позволяло дольше сохранять высокую температуру металла в течение всей заливки. Температура в конце разливки равнялась 1565 °С, что на 25 °С выше, чем в рядовых плавках. Это дало возможность разлить сталь из ковша без остатка. Большая часть шлака осталась в конце разливки жидкой и слилась с ковша при его кантовании самотеком. Затвердевшие вспененные остатки шлака были более хрупкими, чем шлаки рядовых плавок, поэтому они легко разрушались и удалялись из ковша. Трудоемкость их удаления из ковша существенно уменьшилась. Перед выпуском металла ковш был слегка заросшим по верхнему периметру. На дне ковша наблюдались небольшие скопления застывшего металла. После окончания разливки наросты по периметру ковша уменьшились, скопления застывшего металла расплавились, и ковш остался чистым, что позволит увеличить срок службы ковшей. Шлаки были получены с низкими содержаниями оксидов Fe и Mn, о чем свидетельствовал их светло-коричневый цвет. Соответственно, это уменьшило количество этих оксидов и в стали, что повысило жидкотекучесть расплава. Жидкотекучесть определили косвенно по времени заполнения форм с отливками «кронштейн» металлоемкостью 48 кг. При применении рядовой технологии время заполнения форм при температуре 1580 °С составляло в среднем 36 секунд. После диффузионного раскисления время уменьшилось до 31 секунды. Это способствовало устранению брака по недоливам и спаям.

Плавки № 769–770 вели по такой же технологической схеме, что и предыдущую № 768. Учитывая результаты первой плавки, в последующих плавках при доводке стали по химическому составу расход ферромарганца уменьшали из расчета пригара марганца в металле на 2,4 кг/т за счет лучшей раскисленности металла, а ферросилиций исключили полностью, т. е. экономили 4 кг/т. Химический состав сталей приведен в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Химический состав стали

№ плавки стали 35ТЛ	Массовая доля элементов, % по массе					
	C	Si	Mn	S	P	Ti
769	0,35	0,36	0,57	0,05	0,045	0,04
770	0,37	0,26	0,5	0,06	0,04	0,05
771	0,34	0,31	0,55	0,05	0,04	0,04

Как видно из данных табл. 4.3, полученный химический состав стали, %: Mn (0,57; 0,5 и 0,55) и Si (0,36; 0,26 и 0,31) — был близок к среднему по марке

стали, что подтвердило экономию ферросплавов за счет введения дополнительного диффузионного раскисления. Сохранились и другие выявленные преимущества диффузионного раскисления, такие как снижение времени плавки на 10 минут; повышение жидкотекучести стали; отсутствие брака по неспаям и недоливам;

На основании проведенных экспериментов рассчитали ожидаемый экономический эффект от внедрения дополнительного диффузионного раскисления стали за счет экономии ферросплавов и электроэнергии. Он равен 2200 рублям на одну плавку. Расчет приведен в работе [18].

В расчете экономической эффективности не нашел отражение ряд преимуществ, которые выявлены в процессе проведения опытных работ:

1. Повышение стойкости свода и откосов за счет того, что диффузионное раскисление проходит под вспененным шлаком, что предохраняет свод от излучения дуги.
2. Уменьшение брака отливок по неспаям и недоливам и обеспечение полной разливки металла из ковша.
3. Повышение срока службы ковшей и уменьшение трудоемкости их подготовки к следующей разливке.

Кроме того, отмечена высокая технологичность дисперсных раскислителей, так как смеси расфасованы в пакеты по 3 кг, что снижает трудоемкость ручного труда сталеваров и обеспечивает контроль за рациональным расходованием материала.

Таким образом, подтверждены теоретические предпосылки результативности введения в технологический процесс диффузионного раскисления стали, выплавляемых в печах с кислой футеровкой, дисперсными смесями РД. По результатам опытных плавок новый технологический процесс внедрен в производство с экономией ферросплавов.

4.2. При производстве ответственных железнодорожных отливок

4.2.1. В Рубцовском филиале АО «Алтайвагон»

Рубцовский филиал АО «Алтайвагон» специализируется на производстве ответственных отливок из стали для железнодорожного литья. Плавки стали проводят в печах ДСП 6 с основной и кислой футеровкой. Так как, затраты на выплавку стали, выплавленной в печах с килой футеровкой, значительно меньше, чем произведенной в основной печи, исследовали возможность расширения номенклатуры ответственного железнодорожного литья, выплавленных в печах с кислой футеровкой и снижения тем самым себестоимости отливок. ГОСТы 22703, 2253 [255, 32] разрешают производить металл для отливок автосцепки и для аппаратов поглощающих пружинно-фрикционных в печах с кислой футеровкой. На предприятии изготавливают кронштейны, замок автосцепки и некоторые другие — из стали марки 20ГЛ выплавленной в кислой печи. Для этих отливок сдаточной характеристикой

являлась KCU при температурах 20 °С. Однако ответственные отливки из стали 30 ГСЛ-Б для аппаратов поглощающих пружинно-фракционных («корпус» и «горловина корпуса» ГОСТ 22253), а также отливки из стали 30ГСЛ для автосцепных устройств внедрить в производство не смогли, так как не получали KCU^{-60} и KCV^{-60}, как того требуют ГОСТы.

Теоретические предпосылки свидетельствуют, что повысить механические свойства кислой стали можно введением диффузионного раскисления и внепечной обработки расплава и таким образом расширить номенклатуру ответственного литья.

Поэтому для освоения дополнительной номенклатуры ответственного железнодорожного литья, произведенных в печах с кислой футеровкой, при производстве стали применили дополнительную комплексную обработку стали за счет введения в технологический процесс диффузионного раскисления стали дисперсными РД19П, РД21П и ковшовой обработкой стали РСУ.

В ходе работы, используя преимущества и возможности разрабатываемой технологии, параллельно решали следующие задачи по:

– снижению продолжительности плавки и расхода электроэнергии;

– исключение остатков стали в ковше после окончания разливки;

– доскональную уборку шлака из ковшей после разливки и тем самым увеличению количества наливов плавок стали в последние.

Для выявления преимуществ новой технологии провели 10 рядовых плавок стали и 8 экспериментальных плавок сталей 20ГЛ с использованием РД19П, РД21П и РСУ.

Рядовые плавки вели по заводской инструкции. При достижении требуемого содержания углерода в металле во время окислительного периода расплав раскисляли ферросилицием и ферромарганцем из расчета получения концентраций кремния и марганца на нижний предел готовой стали. Отбирали пробы шлака на анализ. Визуально он был черный и это являлось косвенным показателем существенных концентраций в шлаковой фазе оксидов Fe и Mn (табл. 4.15).

Восстановительный период плавки не проводили. Металл нагревали до температуры выпуска. Для ускорения нагрева металла шлак загущали песком. Перед выпуском плавки в печь присаживали известняк для получения жидкоподвижного шлака и снижения в нем оксидов железа. Присаживали ферросилиций из расчета получения среднего содержания Si в металле. Раскисленность стали определяли визуально по цвету шлака, для чего брали шлак на анализ. Обработанный шлак изменял цвет с черного на коричневый. Менялся и цвет излома пробы шлака на темно-зеленый, что косвенно указывало на снижение в шлаковой фазе содержаний FeO и MnO (табл. 4.15). Время доводки и нагрева металла до температуры выпуска составляло 45 минут. Требуемое количество марганца получали при сливе из печи кондиционной стали. Для чего в чайниковый ковш емкостью восемь тонн загружали ФМн78. При заполнении сталью разливочных ковшей Q=0,5 т в них

добавляли пирамидки алюминия для дополнительного раскисления стали. Окончательную пробу металла на химический состав отбирали из третьего разливочного ковша.

При выпуске металла из печи вместе с металлом в ковш сливался и шлак, а остаток его стекал в приямок. Во время транспортировки ковша до разливочного стенда и до начала разливки шлак затвердевал. По периметру верхнего пояса ковша формировалась твердая корка шлака. Во время разливки уровень металла в ковше опускался, а твердая корка оставалась на поверхности ковша. Уборка ее в конце разбора стали и подготовке ковша к следующей разливке отличалось большой трудоемкостью. Остатки корки оставались на ковше. Как правило, при использовании рядовой технологии плавки и разливки ковши быстро зарастали и после 11 разливок отправлялись на ремонт.

Опытные плавки до конца кипа вели по заводской инструкции. Затем кип останавливали присадкой в печь ФС45 и доводили концентрацию Si до 0,17–0,19%. Учитывая предыдущий опыт исследовательских работ, ферросилиций в печь в течение плавки больше не добавляли. Затем ввели дополнительно восстановительный период плавки. Подробно ведение восстановительного периода описано в параграфе 4.1. В печь подавали РД19П из расчета 2 кг/т жидкого. Материал быстро распределялся по поверхности шлака и готовил расплав к последующей присадке РД21П, которая подавалась через 3 минуты из расчета 2 кг/тж. В результате подачи смесей температура стали быстро росла. В расплаве уменьшалось количество кислорода, за счет восстановления FeO и MnO углеродом и алюминием и кремневосстановительных реакций. Через 15 минут после присадки смеси РД21П сталь была достаточно рафинирована, нагрета до температуры выпуска и готова к сливу из печи. Восстановительный период плавки закончился. Новая технология дала возможность в целом уменьшить время плавки на 15 минут.

Таблица 4.4

Компонентный состав рядовых и экспериментальных шлаков по ходу плавки

Момент отбора шлака на анализ	Компонентный состав шлака, % по массе			
	CaO	SiO_2	FeO	MnO
По окончании окислительного периода рядовых и экспериментальных плавок	9,9	46,8	15,82	19,94
По окончании восстановительного периода плавок, выплавленных по заводской технологии	10,5	50,1	6,37	22,4
По окончании восстановительного периода экспериментальных плавок	12,9	52,9	3,0	14,9

Перед сливом расплава брали шлак на анализ и для визуальной оценки. Он существенно посветлел по сравнению со шлаком рядовой плавки.

Поверхность его была светло-коричневой, а излом — светло-зеленым, что косвенно указывало на снижение в нем содержаний оксидов Fe и Mn, что подтверждено химическим составом плавок. Динамика изменения составов шлаков приведена в табл. 4.4.

Данные табл. 4.4 показывают, что диффузионное раскисление шлака обеспечивало удаление FeO и MnO из него, а следовательно, и очистку стали от этих оксидов.

Внепечную обработку проводили РСУ из расчета 2,5 кг/т. В ковш вместе с РСУ присаживали ФМн78. Количество ферромарганца уменьшали из расчета пригара марганца в раскисленном металле на 0,2% (2,4 кг/тж). Окончательное раскисление стали алюминием проводили в разливочных ковшах и брали пробу стали на химический анализ.

Таблица 4.5

Компонентный состав шлака после внепечной обработки РСУ

Шлак	Компонентный состав шлака, % по массе			
	SiO_2	CaO	FeO	MnO
Обработанный в ковше РСУ	14,9	54,2	2,1	9,9

Содержания оксидов FeO и MnO в нем снизилось по сравнению со шлаком перед выпуском стали (табл. 4.5).

Полученный шлак стал более хрупким по сравнению с предвыпускным шлаком, так как в нем увеличилось количество мелких пузырьков CO за счет обработки расплава РСУ. Пробы шлака легко разламывались вручную. Плотность его уменьшилась с 2,95 до 2,57 г/см^3, что существенно ниже плотности спокойного шлака и шлака после обработки РД. При разборе стали из раздаточного чайникового ковша шлак покрывал зеркало металла и опускался в ковше вместе с металлом. Теплопроводность его еще больше понизилась (λ =1 Вт/(м К)), что позволяло металлу сохранять высокую температуру в течение всей заливки форм и дало возможность разливать сталь из ковша без остатка. Остатки хрупкого шлака легко и быстро удалялись из ковша. Ковши под очередную разливку подавались с чистыми стенками и дном, что увеличивало срок их службы.

Концентрации элементов в плавках, выплавленных по заводской технологии, и опытных, были сопоставимы (табл. 4.6).

Близость концентраций Si и Mn в рядовых и экспериментальных плавках свидетельствовало об экономии кремния и марганца за счет снижения угара марганца в хорошо раскисленном металле и пригара кремния за счет кремневосстановительного процесса.

Таблица 4.6

Химический анализ сталей, выплавленных по разным технологиям

Метод выплавки	Химический состав стали, % по массе					
	C	Si	Mn	P	S	Al
По заводской технологии	0,212	0,34	1,237	0,024	0,023	0,069
С восстановительным периодом и ковшовой обработкой	0,205	0,36	1,243	0,025	0,019	0,078

Анализировали механические свойства рядовых плавок (табл. 4.7) и экспериментальных плавок (табл. 4.8) сравнивали их с ГОСТ 977 и между собой. Согласно ГОСТ 977, механические свойства стали 20ГЛ должны быть следующие: σ_T=216 МПа; σ_B=412 МПа; δ=22%; KCU^{+20}=491 кДж/м^2.

Таблица 4.7

Результаты механических свойств стали 20ГЛ рядовых плавок

№ плавки	σ_T, МПа	σ_B, МПа	δ, %	KCU^{+20}, кДж/м^2
3/1082	255	465	28	725 763
2/1042	310	500	28	788 713
2/1113	255	445	26	654 741
3/969	290	480	27	725 688
2/1093	300	475	23	679 630
2/1045	290	490	23	638 675
2/1064	340	540	23,5	788 725
2/1073	275	490	27	750 675
2/1067	315	550	22	688 763
2/1096	295	495	23,5	688 656
Средние значения	**287,5**	**483,5**	**26,05**	**710,6**

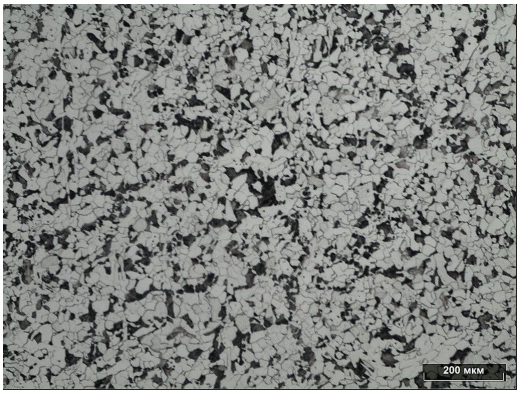
Таблица 4.8

Результаты механических свойств стали 20ГЛ опытных плавок

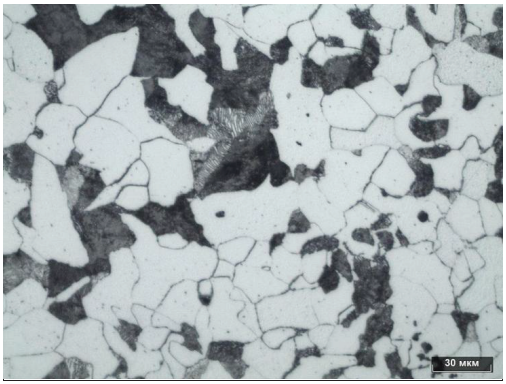
№ плавки	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	KCU^{+20}, кДж/м^2
2/1114	325	510	29	1200 1020
3/1087	310	505	31	1000 1025
3/1088	275	470	28	1188 1200
2/1119	285	475	27	1025 1013
2/1120	290	475	28	875 1100
3/1093	275	475	31	763 750
2/1126	275	455	27	1025 1013
3/1099	290	510	26	1020 1000
Средние значения	**290,63**	**484,4**	**28,38**	**1013,6**

Таблицы свидетельствуют, что параметры механических свойств обычных и опытных плавок значительно превзошли нормативы, регламентированные ГОСТ 977, и мало отличаются друг от друга. Но KCU^{+20}, характеризующая эксплуатационную долговечность отливок, в опытных плавках резко выросла с 710,6 до 1013,6 кДж/м^2, то есть на 30%. Это подтверждает эффективность разработанной технологии. На основании полученных результатов можно утверждать, что диффузионное раскисление и внепечная обработка стали помогут увеличить и KCV^{-60} и эксплуатационную надежность более ответственных отливках. Последний показатель больше всех других зависим от микроструктуры стали. Учитывая вышесказанное, изучили микроструктуру сталей отливок простых и экспериментальных плавок. Изучали образцы с механическими свойствами, близкими к средним значениям KCU^{+20}.

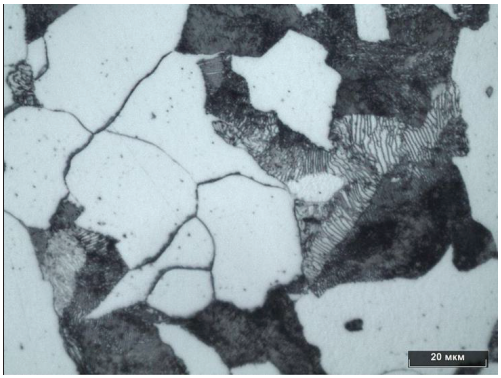
Микроструктуры металлической матрицы стали 20ГЛ после термообработки изучали на травленых шлифах при увеличении в 100, 500 и 1000 раз по ГОСТ 8233-56 и ГОСТ 5639-82. Микроструктура стали, выплавленной в кислой печи по заводской технологии, представлена на рис. 4.3.



×100 Ф35



×500



×1000

Рисунок 4.3. Микроструктура стали 20ГЛ, выплавленной по рядовой технологии, после нормализации, травитель — нитал

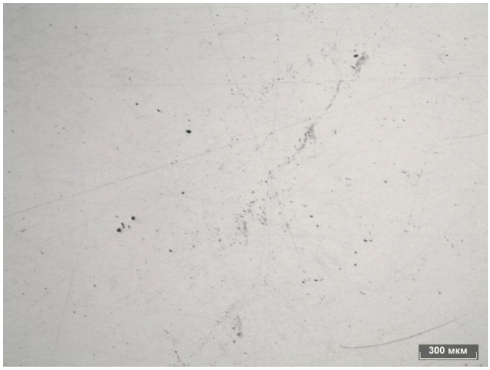
Как видно из рис. 4.3, металлическая матрица по ГОСТ 8233 состоит из 35% феррита и 65% перлита сорбитообразного и пластинчатого. Балл зерна по ГОСТ 5639-82 равен 7–8.

При изучении неметаллических включений исследованию подвергали микрошлифы без предварительного травления.



×50

а



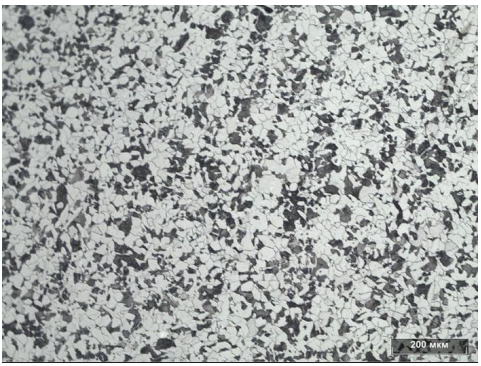
×50

б

Рисунок 4.4. Неметаллические включения в стали 20ГЛ, выплавленной по рядовой технологии: а — единичные включения остроугольной и округлой формы беспорядочного расположения; б — скопления мелких включений в виде тонких цепочек

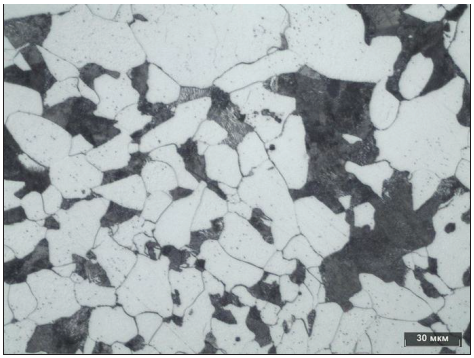
На шлифах (рис. 4.4.) наблюдаются единичные неметаллические включения остроугольной и округлой формы беспорядочного расположения и скопления мелких включений в виде тонких цепочек, расположенных преимущественно по границам аустенитного зерна. Индекс загрязненности стали неметаллическими включениями ($I \cdot 10^{-3}$) составил $2{,}595 \cdot 10^{-3}$.

Микроструктура металлической матрицы стали 20ГЛ, выплавленной в кислой печи по новой технологии с восстановительным периодом и внепечной обработкой, после термообработки представлена на рис. 4.5.

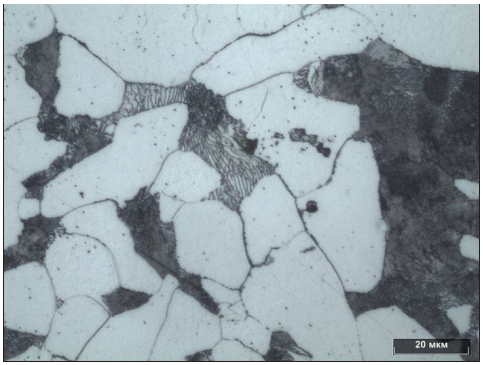


×100

Ф35



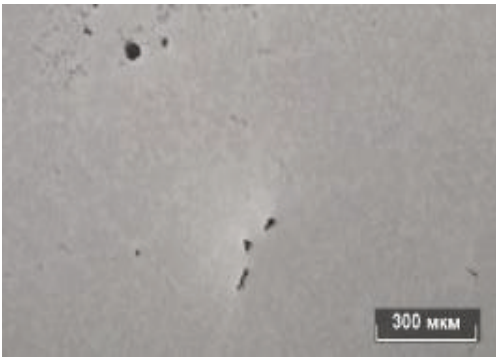
×500



×1000

Рисунок 4.5. Микроструктура стали 20ГЛ, выплавленной по экспериментальной технологии, после нормализации, травитель — нитал

Как видно из рис. 4.5, металлическая матрица стали, выплавленной по новой технологии, по сравнению со сталью, произведенной по действующей технологии, практически не изменилась и состоит из 35% феррита и 65% перлита сорбитообразного и пластинчатого. Балл зерна равнялся 7–8. Но неметаллических включений в стали стало меньше (рис.4.6).

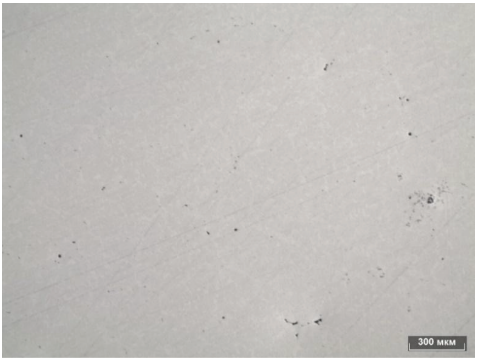


×50

Рисунок 4.6. Неметаллические включения в стали 20ГЛ, выплавленной по экспериментальной технологии

На шлифах наблюдается меньше неметаллических единичных включений остроугольной и округлой формы беспорядочного расположения и меньше скоплений мелких включений. Индекс загрязненности стали неметаллическими включениями ($I \cdot 10^{-3}$) резко уменьшился и составил $1{,}94 \cdot 10^{-3}$.

После внепечной обработки металлическая матрица стали не изменилась, но сталь стала еще чище. Индекс загрязненности составил $1{,}47 \cdot 10^{-3}$ (рис. 4.7).



×50

Рисунок 4.7. Неметаллические включения в стали 20ГЛ, выплавленной с применением восстановительного периода и внепечной обработкой

Это еще раз подтвердило эффективность разработанной технологии и дало возможность приступить к экспериментам по переводу других, более ответственных отливок, на выплавку стали в печах с кислой футеровкой.

Плавки стали 30ГСЛ-Б (№ 4/555, 2/570)

Следующие две плавки проводили для изготовления ответственных отливок «корпус» и «горловина корпуса» из стали 30 ГСЛ-Б для аппаратов поглощающих пружинно-фракционных, которые должны отвечать требованиям ГОСТ 2253 [255].

Химический состав и механические свойства стали согласно требованиям ГОСТ 2253 приведены в табл. 4.9, 4.10.

Таблица 4.9

Химический состав стали

Марка стали	Химический состав, % по массе							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S	P
				не более				
30ГСЛ-Б	0,25–0,35	0,2–0,5	1,2–1,6	0,3			0,04	

Таблица 4.10

Механические свойства стали

Механические свойства				
$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	Ψ, %	KCU^{-60} кДж/м^2
657	490	10	20	294

Сдаточными характеристиками механических свойств стали для корпусных отливок являются предел текучести и относительное удлинение.

В первой плавке стали 30ГСЛ-Б после окончания окислительного периода довели концентрации марганца и кремния до нижних пределов. Ферросилиций впоследствии не присаживали. На шлак были отданы раскислительные смеси из расчета по 2 кг на одну тонну жидкого (по 5 пакетов). Вначале подали РД19П и вслед за ней РД21П. Восстановительный период проходил под вспененным шлаком и стал короче по сравнению с рядовой плавкой на 10 минут. По окончании восстановительных реакций шлак в печи был жидкий. Проба шлака была плотной и имела блестящий коричневый цвет, что свидетельствовало о низком содержании в нем FeO и MnO. В первой плавке внепечную обработку расплава решено было не проводить для определения эффективности внепечной обработки в последующей плавке. Количество ферромарганца уменьшали из расчета пригара марганца в раскисленном металле на 0,2% (2,4 кг/т)

Во время опустошения ковша на разливочном стенде шлак опускался в ковше вместе с металлом и корку на поверхности ковша не образовал. В середине разливки стали наблюдалась длительная остановка конвейера на 15 минут. Тем не менее металл был разлит полностью. Остатки шлака из ковша были легко удалены в шлаковню. Ковш под очередную разливку был подан с чистыми стенками и дном.

Химический состав и механические свойства стали приведены в табл. 4.11, 4.12.

Таблица 4.11

Химический состав опытной плавки стали 30ГСЛ-Б

№ плавки	Химический состав, % по массе							
	C	Si	Mn	Cr	Cu	S	P	Ni
4/555	0,29	0,43	1,24	0,12	0,15	0,023	0,025	0,11

Таблица 4.12

Механические свойства опытной плавки стали 30ГСЛ-Б

Уровень механических свойств	Механические свойства стали					
	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	Ψ, %	KCU^{-60} кДж/м^2	
					Обр. № 1	Обр. № 2
По ГОСТ 2253	657	490	10	20	294	294
Плавка 4/555	740	600	13,5	34	310	300

Как видно из данных табл. 4.11, 4.12, химический состав и механические свойства стали соответствовали требованиям ГОСТ 2253. Следует отметить, что сдаточные механические свойства существенно превысили нормативные показатели, к примеру, $\sigma_т$ вырос на 22,4%. Рост пластических характеристик оказался выше. δ увеличилось на 45%. Для дальнейшего повышения показателей механических свойств следующую плавку провели с использованием внепечной обработки расплава.

Плавка стали 30ГСЛ-Б № 2/570

Плавку стали 30ГСЛ-Б № 2/570 вели с диффузионным раскислением стали РД по такой же технологии, как и предыдущую. Однако металл этой плавки был дополнительно обработан в ковше рафинирующей смесью РСУ. Перед выпуском на дно раздаточного ковша загружали РСУ из расчета 4,5 кг/т жидкого и марганецсодержащие ферросплавы. Алюминий присаживали под струю металла при наполнении разливочных ковшей. Окончательную пробу металла на химический состав отбирали из третьего разливочного ковша.

После внепечной обработки шлак в ковше оставался вспененным светло-коричневым и светло-зеленным в изломе.

Таблица 4.13

Компонентный состав шлака

Вид шлака	Компонентный состав шлака, % по массе			
	SiO_2	CaO	FeO	MnO
Из ковша после обработки РСУ	15,2	53,8	1,95	10,3

Концентрации FeO и MnO в нем снизилось по сравнению со шлаком перед выпуском экспериментальных плавок (табл. 4.3) и оказались сопоставимы по сравнению с экспериментальными плавками после обработки РСУ (табл. 4.5).

Полученный шлак охрупчивался более существенно, чем предвыпускной, так как был более вспененным. При разборе стали из раздаточного чайникового ковша шлак покрывал зеркало металла и опускался в ковше вместе с металлом. Шлак, обработанный РСУ, отличался пониженной плотностью и теплопроводностью, что позволяло металлу сохранять более высокую температуру в течение всей заливки форм и разливать сталь из ковша без остатка. За время разливки температура металла уменьшилась только на 25 °С. Уменьшилась также трудоемкость удаления остатков хрупкого шлака из ковша. Ковш остался чистым, что увеличивает срок его службы и трудоемкость его подготовки к следующей разливке.

Химический состав и механические свойства стали приведены в табл. 4.14, 4.15.

Таблица 4.14

Химический состав стали

№ плавки	Химический состав, % по массе							
	C	Si	Mn	Cr	Cu	S	P	Ni
2/570	0,33	0,55	1,46	0,14	0,13	0,022	0,024	0,12

Таблица 4.15

Механические свойства стали

Уровень механических свойств	Механические свойства стали					
	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	Ψ, %	KCU^{-60} кДж/м^2	
					Обр. № 1	Обр. № 2
По ГОСТ 2253	657	490	10	20	294	294
Плавка 2/570	790	680	14,5	32	321	315

Как видно из данных табл. 4.14, химический состав стали соответствовал требованиям ГОСТ 2253. Следует отметить, что в стали выросла концентрация марганца, что свидетельствует об уменьшении его угара, чему способствовала внепечная обработка. Резко вырос $\sigma_т$ с 480 до 680 — на 38% по сравнению с нормативным показателем и на 13,3% по

сравнению с предыдущей плавкой и относительное удлинение с 10 до 14%, то есть 28,5%. Таким образом, подтверждена результативность внепечной обработки стали РСУ для повышения механических свойств и обеспечения требуемой эксплуатационной надежности. Все дальнейшие плавки проводились с использованием РСУ.

Расчеты показали, что экономия электроэнергии на одну плавку при сокращении времени плавки на 10 минут составляет 1016 рублей.

В расчете экономического эффекта не учтены:

– увеличение производительности труда на плавильном участке в результате разливки металла из ковшей без остатка и уменьшения трудоемкости подготовки ковшей к очередной разливке;

– увеличение срока службы ковшей как минимум вдвое;

– экономия ферросилиция и ферромарганца.

Но самое главное, удешевление литья с внедрением новой технологии происходит за счет перевода номенклатуры ответственного литья, выплавляемого в печах с основной футеровкой на кислые печи. С внедрением новой технологии диффузионного раскисления и внепечной обработки стали 20ГЛ планируется изготавливать самые сложные отливки первой группы корпус автосцепки и тяговый хомут с выплавкой стали в печах с кислой футеровкой.

На основании вышеизложенного принято решение внедрить технологический процесс диффузионного раскисления и внепечной обработки в производство.

4.2.2. В ООО «ВКМ-Сталь»

ООО «ВКМ-Сталь освоило производство отливок из стали 20ГЛ для автоматической сцепки железнодорожных вагонов. Для снижения себестоимости отливок выплавку стали для их изготовления начали проводить в печах с кислой футеровкой. Наиболее сложной является основная часть автосцепки, отливка «корпус», предназначенный для передачи колоссальных тяговых и ударных нагрузок, а также размещения в нем деталей механизма сцепления. Для гарантированного обеспечения требуемых нагрузок отливки «корпус» подвергаются закалке в воде и высокому отпуску, а также внепечной обработке расплава в ковше РСУ из расчета 5 кг/т.

Определили влияние закалки и высокого отпуска на свойства стали. Для этого исследовали отливки «корпус» залитых из одного раздаточного ковша с отливками второй группы, подвергаемых нормализации и улучшению с применением РСУ и без него.

Плавка 2-587 от 11.07.22. Плавка проводилась без применения РСУ

Таблица 4.16

Химический состав стали

C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Ni, %	S, %	P, %	Al, %	Cu, %
0,18	0,40	1,04	0,07	0,09	0,03	0,02	0,05	0,15

Таблица 4.17

Механические свойства стали

Способ т.о.	Механические свойства							
	σт, МПа	**σв, МПа**	**δ, %**	**Ψ, %**	**KCU (+20 °C) кДж/м²**	**KCU (-60 °C) Дж/см²**	**KCU (-60 °C) Дж/мм²**	**KCV (-60 °C) Дж/см²**
Нормализация	315	512	26	47	510			
Улучшение	474	617	22	44	_	_	51	30

Плавка 2-610 от 03.07.2023. Плавка проводилась с применением РСУ

Таблица 4.18

Химический состав стали

C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Ni, %	S, %	P, %	Al, %	Cu, %
0,22	0,50	1,33	0,07	0,08	0,025	0,028	0,055	0,28

Таблица 4.19

Механические свойства стали

Способ т.о.	Механические свойства							
	$\sigma_т$, МПа	**$\sigma_в$, МПа**	**δ, %**	**Ψ, %**	**KCU (+20 °C) кДж/м²**	**KCU (-60 °C) Дж/см²**	**KCU (-60 °C) Дж/мм²**	**KCV (-60 °C) Дж/см²**
Нормализация	326	510	26	39	510	25		
Улучшение	673	805	12	26	–	–	42	25

Как видно из данных таблиц, при одном и том же химическом составе стали закалка и высокий отпуск отливок способствуют существенному росту $\sigma_т$ и $\sigma_в$ по сравнению с нормализованной сталью. Особенно резко растут $\sigma_т$ и $\sigma_в$ по сравнению с этими показателями нормализованной стали при ковшовой обработке стали РСУ. Так, после закалки и отпуска без применения РСУ $\sigma_т$ вырос с 315 до 415 МПа, то есть на 24%, а $\sigma_в$ вырос с 512 до 617 МПа, то есть на 17%. После применения РСУ $\sigma_т$ вырос с 326 до 673 МПа, то есть на 51%, а $\sigma_в$ выросло с 510 до 805 МПа, то есть на 36%. Таким образом, подтверждается справедливость теоретических предпосылок о важности внепечной обработки РСУ кислой стали для повышения надежности автосцепки, испытывающей значительные растягивающие нагрузки.

Наиболее объективную оценку показателей механических свойств дает статистическая обработка данных. Произвели статистическую обработку

результатов плавок с применением термической обработки улучшение до внедрения без использования РСУ. Результаты представлены в табл. 4.20.

Таблица 4.20

Качественные показатели улучшенных плавок стали без применения РСУ

Переменные	STATISTICA без РСУ 1–3 печь						
	Кол. плавок	Среднее значение	Минимум	Максимум	Дисперсия	Ср. кв. отклонение	Коэф. вариации, V, %
C, %	25	0,2150	0,1800	0,2500	0,001	0,02273	10,57223
Si, %	25	0,4030	0,2400	0,4800	0,004	0,06701	16,62716
Mn, %	25	1,1610	0,8300	1,3800	0,026	0,16258	14,00344
Cr, %	25	0,1100	0,0400	0,1900	0,002	0,04000	36,36364
Ni, %	25	0,0930	0,0700	0,1400	0,001	0,02263	24,33584
S, %	25	0,0302	0,0130	0,0480	0,000	0,00851	28,17490
P, %	25	0,0247	0,0200	0,0280	0,000	0,00267	10,80465
Al, %	25	0,0364	0,0170	0,0520	0,000	0,01328	36,47403
Cu, %	25	0,1370	0,1200	0,1600	0,000	0,01636	11,94446
σ_T, МПа	25	484,8000	280,0000	566,0000	6596,178	81,21686	16,75265
σ_B, МПа	25	637,5000	486,0000	744,0000	4677,611	68,39306	10,72832
δ, %	25	18,8000	14,0000	26,0000	18,844	4,34102	23,09053
Ψ, %	25	42,0000	33,0000	54,0000	65,111	8,06915	19,21225
KCV^{-60}, Дж/см^2	25	27,5000	20,0000	37,0000	90,722	9,52482	34,63571

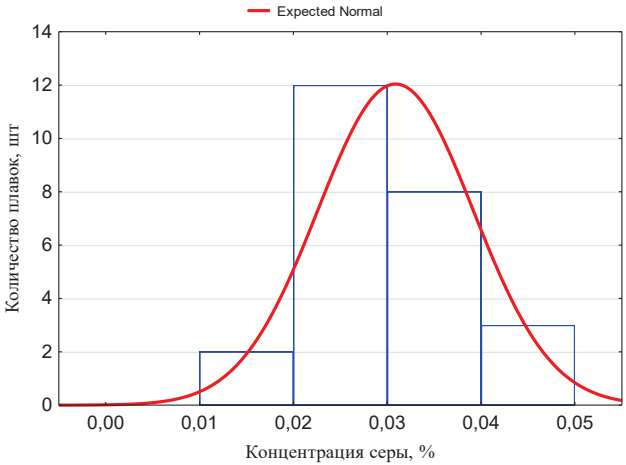


Рисунок 4.8. Гистограмма концентраций серы

Как видно из данных табл. 4.20, средние показатели химического состава и механических свойств соответствуют требованиям ГОСТ 22703. Вместе с тем максимальные концентрации серы (0,048%) превысили допустимый предел, равный 0,04%, в трех плавках, что видно на гистограмме (рис. 4.8).

Кроме того, минимальные значения σ_T и σ_B двух плавок ниже допустимых значений ГОСТ 22703 (рис. 4.9, 4.10).

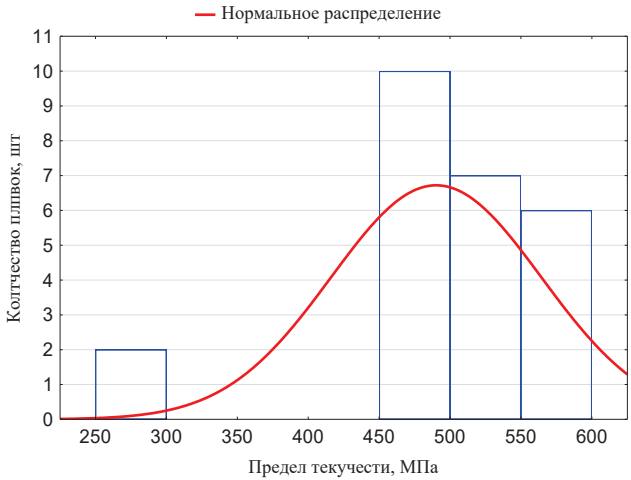


Рисунок 4.9. Гистограмма предела текучести

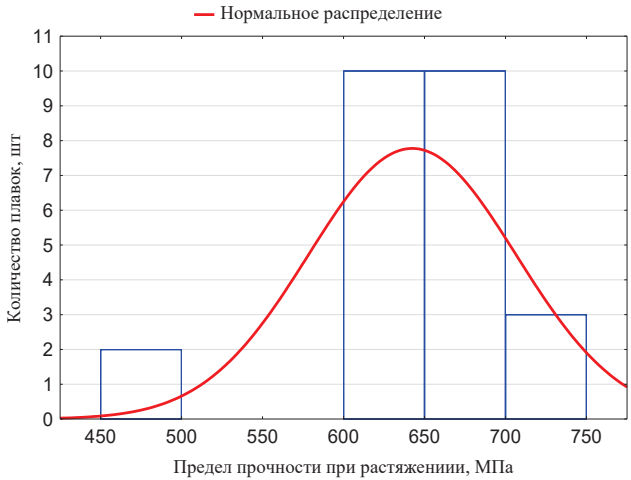


Рисунок 4.10. Гистограмма предела прочности при растяжении

Произвели статистическую обработку результатов плавок после внедрения внепечной обработки расплава РСУ. Результаты представлены в табл. 4.21.

Таблица 4.21

Качественные показатели улучшенных плавок стали с применением РСУ

Переменные	STATISTICA с РСУ 1–3 печь						
	Кол. плавок	Среднее значение	Минимум	Максимум	Дисперсия	Ср. кв. отклонение	Коэф. вариации, V, %
C, %	25	0,2088	0,1700	0,2500	0,000	0,02128	10,18964
Si, %	25	0,4880	0,4000	0,5800	0,002	0,04435	9,08752
Mn, %	25	1,2412	1,0300	1,4600	0,015	0,12384	9,97733
Cr, %	25	0,1016	0,0500	0,1500	0,001	0,02544	25,04207
Ni, %i	25	0,1116	0,0700	0,6000	0,011	0,10355	92,78557
S, %	25	0,0224	0,0120	0,0340	0,000	0,00667	29,72964
P, %	25	0,0248	0,0180	0,0310	0,000	0,00325	13,11776
Al, %	25	0,0464	0,0200	0,0600	0,000	0,01547	33,34719
Cu, %	25	0,1300	0,0900	0,2800	0,002	0,04052	31,16730
$\sigma_т$, МПа	26	551,4231	459,0000	678,0000	4086,254	63,92381	11,59252
$\sigma_в$, МПа	26	713,6923	611,0000	845,0000	4919,102	70,13631	9,82725
δ, %	26	15,6154	12,0000	24,0000	10,566	3,25056	20,81641
Ψ, %	26	32,3077	26,0000	51,0000	47,662	6,90373	21,36870
KCV^{-60}, Дж/см^2	26	23,3846	20,0000	27,0000	4,806	2,19229	9,37494

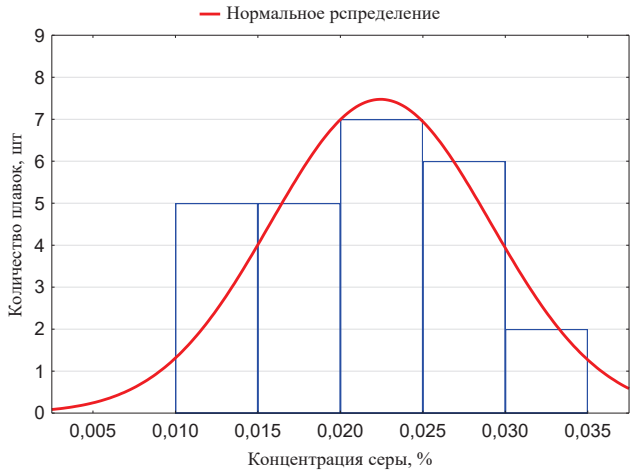


Рисунок 4.11. Гистограмма концентраций серы после внедрения

Как видно из данных табл. 4.20 и 4.21, применение ковшовой обработки сталей 20ГЛ для отливок корпус автосцепки первой группы способствует существенному снижению серы в расплаве в среднем с 0,0302 до 0,0204%, то есть на 25,8%, Максимальные концентрации серы не превысили допустимые ГОСТ 22703 значения (рис. 4.11).

Особенно наглядно видна эффективность внепечной обработки расплава РСУ на совмещенной гистограмме концентраций серы до и после внедрения (рис. 4.12).

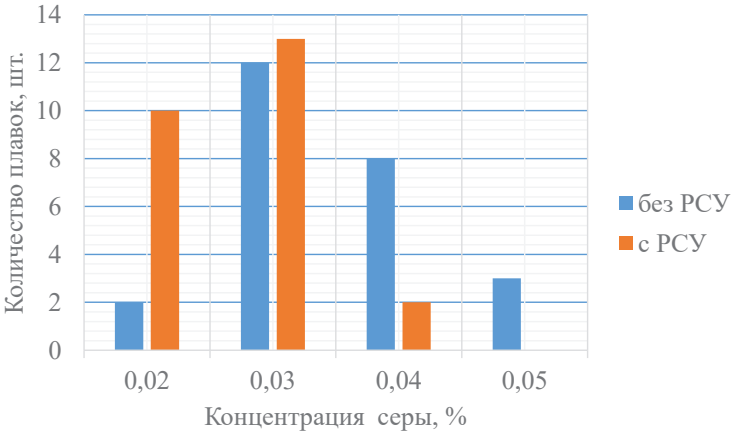


Рисунок 4.12. Совмещенные гистограммы концентраций серы до и после внедрения РСУ

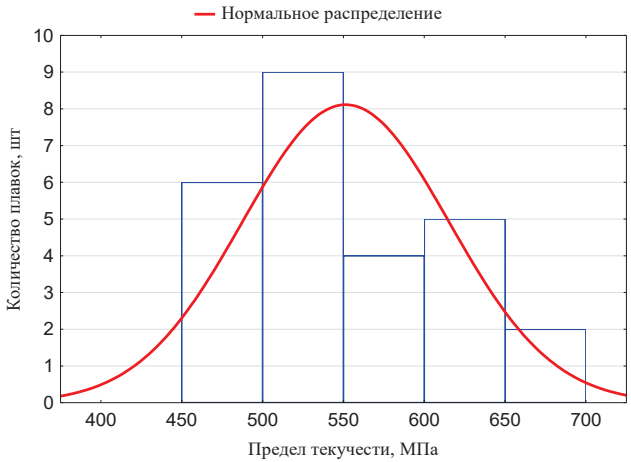


Рисунок 4.13. Предел текучести после внедрения

В свою очередь, активизации десульфурации приводит к резкому увеличению растягивающих нагрузок стальных образцов после улучшения. Как видно из рис. 4.13, 4.14, не было значений прочностных характеристик стали ниже допустимых по ГОСТ 22703. Кроме того, σ_T в среднем увеличивается с 484 до 551 Дж/см^2, то есть на 12%, а σ_B увеличивается с 637 до 713 Дж/см^2, то есть на 11%. Это дает возможность автосцепке выдерживать высокие растягивающие нагрузки и способствует повышению эксплуатационной надежности автосцепного устройства. Ударная вязкость с острым надрезом соответствует требованиям ГОСТ 22703, что обеспечивает возможность выдерживать устройству также и высокие ударные нагрузки.

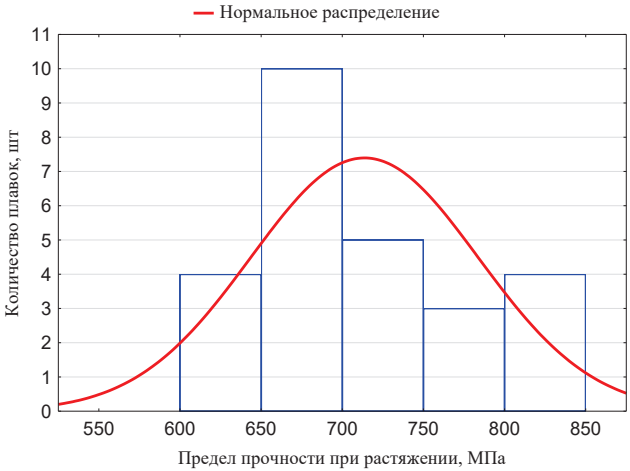


Рисунок 4.14. Предел прочности при растяжении после внедрения

Таким образом, подтверждены теоретические предпосылки об эффективности внепечной обработки РСУ на печах с кислой футеровкой [247].

Кроме того, применение РСУ дает еще целый ряд преимуществ, а именно:

1. Химический анализ шлаков показал, что после обработки РСУ наблюдается резкое снижение содержания вредных оксидов в шлаке, а следовательно, и в расплаве FeO на 60% и MnO на 55%. Шлак с применением РСУ становится заметно светлее: он приобретает более светлую коричневую окраску по поверхности, а в изломе становится светло-зеленым или светло-голубым.

2. После разбора металла ковши остаются чистыми без остатков шлака и металла, что снижает трудоемкость подготовки ковша к следующему выпуску плавки и повышает производительность труда плавильного участка. Этому способствует характерная особенность шлака после обработки РСУ, он

становится более хрупким и отличается низкой теплопроводностью. В результате работает как «одеяло» и не дает длительное время остывать металлу, что способствует более полному разбору стали из ковша, так как металл остывает более медленно, что увеличивает количество залитых форм и, соответственно, производительность формовочной линии [248].

4.3. На Анжерском машиностроительном заводе для нужд горнодобывающей промышленности

«Анжерский машиностроительный завод» является одним из крупнейших предприятий, производящих оборудование для нужд горнодобывающей промышленности: предприятий подземной добычи угля, железной и других руд, открытой добычи полезных ископаемых. При добыче полезных ископаемых большие динамические нагрузки испытывают редукторы комбайнов, и от них во многом зависит эксплуатационная надежность комбайнов. Поэтому перед заводом поставлена задача, прежде всего, повысить эксплуатационную надежность редукторов. Поскольку литейное производство ОАО «Анжеромаш» специализируется на изготовлении литых заготовок для редукторов (корпуса, крышки, боковины) поэтому повышение их механических свойств и эксплуатационной надежности весьма актуально. Это отливки ответственного назначения. Изготавливаются они из конструкционной легированной стали 25ГСЛ по ТУ 24-1-12-181-75.

Требования к химическому составу и механическим свойствам стали приведены в табл. 4.22, 4.23.

Таблица 4.22

Химический состав стали 25ГСЛ

Химический состав, % по массе							
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,22–0,28	0,6–0,8	1–1,3	до 0,3	до 0,3	до 0,3	до 0,3	до 0,3

Таблица 4.23

Механические свойства при Т=20° С материала 25ГСЛ

	Размер	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ	φ	KCU	Термообработка
Сортамент	мм	МПа	МПа	%	%	кДж /м^2	-
Отливки	до 100	470	245	18	30	290	Нормализация 900–920° С, Отпуск 580–600° С,

Твердость 25 ГСЛ после закалки	НВ 10^{-1}=207 МПа
Твердость 25 ГСЛ после нормализации и отпуска	НВ 10^{-1}=123–149 МПа

Плавки стали 25ГСЛ ведут в дуговой сталеплавильной печи ДСП-3М с кислой футеровкой. Металлоемкость печи составляет 4 тонны. Разливку стали производят из чайникового ковша емкостью 4 тонны. Температура выпуска

стали составляет1630–1670 °С, а температура заливки 1590–1545 °С. При литье стали возникали текущие проблемы, связанные, с недостаточной жидкотекучестью расплава на нижнем температурном пределе заливки. В отливках появлялись дефекты, такие как недолив и неспай. Для их предотвращения при достижении температуры металла ниже 1545 °С заливку прекращали. В результате охлаждения металла в конце разливки сталь с низкой жидкотекучестью не полностью сливалась из ковшей и в них образовывались «козлы».

Для повышения механических и эксплуатационных свойств отливок и повышения технологичности процессов в условиях ОАО «Анжеромаш» в классический технологический процесс плавки стали, применяемый на заводе, дополнительно ввели диффузионное раскисление стали и внепечную обработку расплава с использованием материалов РД19П, РД21П и РСУ, что позволило резко повысить механические свойства и жидкотекучесть стали, стойкость разливочных кошей, снизить материальные затраты и расход электроэнергии.

В период с 05.06.2024 по 07.06.2024 провели три плавки стали 25ГСЛ по заводской технологии. Полученные результаты механических свойств и микроструктур стали 25ГСЛ использовали для сравнения с результатами опытных плавок. Результаты приведены в табл. 4.24, 4.25.

Таблица 4.24

Химический состав и механические свойства рядовых плавок

№ плавки	Химический состав, % по массе						Механические свойства		
	C	Si	Mn	S	P	Al	$\sigma_в$, МПа	НВ	KCU, Дж/см^2
564	0,25	0,74	1,28	0,034	0,022	0,06	630	146	74,75
567	0,22	0,67	1,30	0,034	0,029	0,054	636	143	69,85
570	0,25	0,53	0,80	0,034	0,022	0,06	687	170	41,65
Ср. знач.	**0,24**	**0,647**	**1,127**	**0,034**	**0,024**	**0,058**	**651**	**153**	**62,08**

Таблица 4.25

Микроструктура рядовых плавок

№ плавки	Группа неметаллических включений, ГОСТ 1778-2022			Металлическая матрица	
	оксиды	силикаты	сульфиды	Матрица	Балл зерна
564	3	4	4	Ф+П	3
567	2	5	4	Ф+П	3
570	3	5	4	Ф+П	3

После чего провели 7 опытных плавок с применением раскислительных и рафинирующей смесей РД19П, РД21П и РСУ.

Плавка № 608 от 05.07.2024

В качестве металлозавалки использовали лом 2А — 2300 кг; возврат собственного производства — 1500 кг; ферросилиций ФС-45 — 5 кг; ферросиликомарганец — 135 кг; феррованадий ФВд-50 — 5 кг; алюминий — 5 кг. Итого металлическая часть шихты составила 3950 кг.

Плавление вели согласно заводской инструкции на 1-й ступени печного трансформатора. Как только под электродами появился жидкий металл, в печь присадили сухой песок и известняк в соотношении 3/1, чтобы покрыть металл слоем шлака. Во время всего периода плавления шлак поддерживали в жидкотекучем состоянии за счет подачи песка на жидкий шлак и известняка на густой. После расплавления металлозавалки взяли первую пробу металла для определения содержания C, Si, Mn, S, P и других элементов для корректировки химического состава стали в процессе плавки. Химический состав металла по ходу плавки и по расплавлению (проба 1) приведен в табл. 4.26.

Таблица 4.26

Химический состав стали по ходу ведения плавки

№ пробы	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	Ni	V	B
1	0,32	0,12	0,26	0,026	0,027	–	0,196	0,232	0,189	0,020	0,0013
2	0,16	0,02	0,06	0,026	0,027	–	0,161	0,217	0,189	0,019	0,0011
3	0,19	0,65	1,09	0,036	0,031	–	0,208	0,216	0,190	0,084	0,0016

Как видно из данных табл. 4.26 (проба 1), концентрация углерода по расплавлению составила 0,32%. Приступили к окислительному периоду плавки согласно технологической инструкции. Окислительный период проводили при температуре расплава не менее 1530–1560 °C. Для энергичного кипения ванны в печь присаживали железнорудные окатыши. В период кипения металла среднюю скорость выгорания углерода выдерживали в количестве 0,1% в течение 10 минут, что обеспечило эффективную дегазацию металла. При кипящей ванне провели легирование стали ванадием присадкой в печь 5 кг феррованадия. Взяли пробу окислительного шлака (рис. 4.15) для визуальной оценки окисленности шлака и металла. Черный цвет шлака свидетельствовал о большом количестве FeO и других оксидов и существенной окисленности шлака и металла. Взяли вторую пробу металла на химический состав. Результат второй пробы приведен в табл. 4.26 (проба 2). Содержание кремния после кипа равнялось 0,02%. Для остановки кипа присадили в печь ферросилиций ФС-45 в количестве 5 кг. Через 2 минуты присадили силикомарганец МнС-17 в количестве 100 кг и провели выдержку

металла в течение 10 минут. Продолжительность окислительного периода составила 25 минут.



Рисунок 4.15. Шлак окислительного периода

Восстановительный период проводили на 9-й ступени печного трансформатора. Присадкой извести довели шлак до требуемой консистенции (рис. 4.16). При остывании он стал плотным (без пузырьков), блестящим, темно-коричневого цвета на поверхности и темно-зеленым в изломе.



Рисунок 4.16. Шлак восстановительного периода

Шлак соответствовал эталону, принятому на заводе. Затем взяли третью пробу стали на химический анализ. Как видно из данных табл. 4.26, химический анализ (3-я проба) был близок к требуемому для данной марки стали. Произвели диффузионное раскисление шлака раскислительными смесями РД19П и РД 21П из расчета по 1,5 кг на 1 т жидкой стали по технологии, подробно описанной в параграфе 4.1.

В результате обработки шлака смесями РД он был постоянно вспененным. Температура металла под таким шлаком неуклонно росла, причем значительно быстрее, чем в рядовых плавках. Это способствовало

уменьшению времени плавки и экономии электроэнергии. По мере роста температуры металла и шлака развивались реакции восстановления оксидов FeO и MnO по реакциям (2.31), а затем и эндотермические реакции (1.8–1.10) восстановления Si из SiO_2, результат которых позволил экономить ферросилиций. После окончания реакций рафинирования закончился восстановительный период плавки. Взяли пробу шлака на визуальный анализ. Она изображена на рис. 4.17.

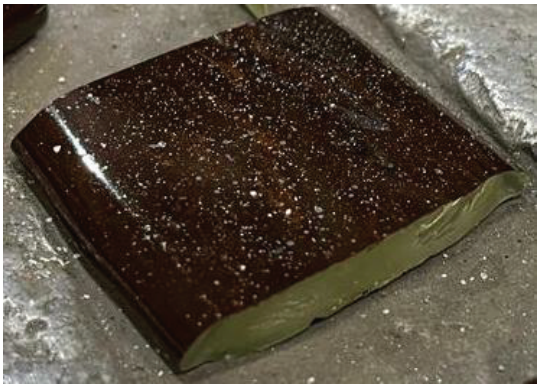


Рисунок 4.17. Шлак после рафинирования смесями РД19П и РД21П

Как видно, шлак существенно посветлел, стал светло-коричневым снаружи, что свидетельствует о восстановлении из шлака большого количества FeO.

Продолжительность восстановительного периода составила 20 минут, что на 5 минут меньше, чем в рядовых плавках. Температура металла в печи перед выпуском равнялась 1670 °С. В разливочный ковш вместе с Al загрузили рафинирующую смесь РСУ — 10 кг, после чего произвели выпуск металла.

При присадке смеси РСУ в ковш запускается флотационно-адсорбционный принцип рафинирования расплава. $CaCO_3$ и Na_2CO_3, присутствующие в смеси, диссоциируют по реакциям 2.30. В результате реакций создается поток рафинирующего газа и начинается флотация неметаллических включений.

После диссоциации карбонатов образуется шлак на основе дисперсного CaO обладающего максимальной основностью. Образующийся Na_2O снижает температуру плавления CaO до температуры 1100 °С, а находящийся в смеси РСУ фторид кальция максимально снижает вязкость образующегося шлака. Начинается адсорбционный период рафинирования. Образующиеся высокоосновные капли шлака, практически с нулевой окисленностью коагулируют, легко адсорбируют сульфиды, а также оксиды, такие как FeO, MnO. Очень важно, что такая шлаковая смесь способна адсорбировать оксид алюминия и растворять его, так как при выпуске стали производят

окончательное раскисление алюминием в ковше. При этом образуется Al_2O_3, который, адсорбируясь шлаком, разжижает его. При обработке стали РСУ одновременно проходит процесс разбавления образующегося рафинировочного шлака продуктами раскисления и печным шлаком, что с течением времени снижает его эффективность. Температура металла в ковше после слива равнялась 1640 °С, в начале разливки 1590 °С. Отмечено, что последние две формы заливались на нижнем допустимом температурном пределе 1553–1545 °С. Вместе с тем, была установлена удовлетворительная жидкотекучесть стали, которая была выше, чем в рядовых плавках при таких температурах. Формы легко заполнились. Брака по неспаям и недоливам, при осмотре данных отливок после выбивки и очистки, не было. Применение РД19П и РД21П способствовало повышению содержания С в стали на 0,02–0,03%, благодаря наличию в составе раскислительных смесей активного углерода. Это позволило экономить 50% передельного чугуна, для корректирования химического состава стали по углероду. Из ковша взяли пробу шлака для визуальной оценки (рис. 4.18).

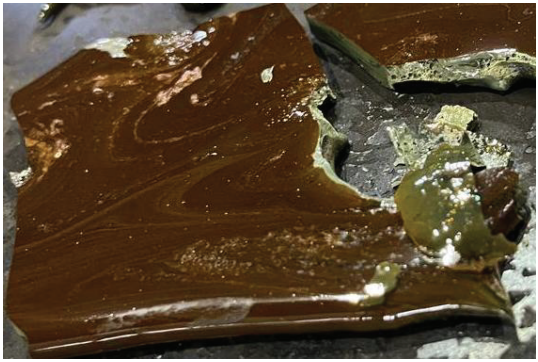


Рисунок 4.18. Проба шлака из ковша

Как видно, шлак стал светло-коричневым, что свидетельствовало об эффективном рафинировании металла и шлака в ковше.

Во время разливки стали были залиты пробы на механические испытания и исследования микроструктуры металла. Окончательный химический состав стали приведен в табл. 4.27.

Таблица 4.27

Окончательный химический состав стали 25ГСЛ

Плавка №	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	Ni	V	B	Ca
608	0,27	0,74	1,07	0,038	0,026	0,034	0,224	0,215	0,187	0,085	0,0032	≤0,0005

Как видно из данных таблицы, химический состав удовлетворял требованиям марки стали.

Таблица 4.28

Механические свойства стали плавки 608

Механические свойства стали плавка 608		
$\sigma_{B,}$ МПа	НВ	KCU, Дж/см^2
700	143	71,1

Данные табл. 4.28 свидетельствуют, что механические свойства экспериментальной плавки существенно превысили показатели рядовых плавок, где средние значения свойств составили: предел прочности при растяжении равнялся 651 МПа, НВ=153, KCU=62,08 Дж/см^2 (табл. 4.24). В микроструктуре экспериментальной плавки стали был зарегистрирован 6-й балл зерна, тогда как в рядовой плавке, он соответствовал 3-му баллу (табл. 4.25).

Для подтверждения полученных результатов было проведено шесть опытных плавок с применением РД19П, РД21П и РСУ. Результаты экспериментальных плавок представлены в табл. 4.30.

Таблица 4.29

Качественные показатели плавок, выплавленных с применением РД19, РД21, РСУ

№ плавка	Химический состав, % по массе						Механические свойства			Балл зерна
	C	Si	Mn	S	P	Al	$\sigma_{B,}$ МПа	НВ	KCU, Дж/см^2	
608	0,27	0,74	1,07	0,038	0,027	0,034	700	143	71,1	6
609	0,23	0,59	1,19	0,036	0,029	0,038	728	163	84,55	6
626	0,022	0,76	1,38	0,039	0,029	0,113	638	146	–	5
636	0,27	0,87	1,57	0,041	0,038	0,029	747,5	149	–	6
637	0,23	0,82	1,36	0,044	0,040	0,054	693,5	146	–	5
639	0,25	0,73	1,29	0,042	0,038	0,020	732	163	–	6
Ср. зн.	**0,24**	**0,751**	**1,31**	**0,04**	**0,033**	**0,048**	**706,5**	**151,6**	**77,82**	

Как видно из данных табл. 4.30, были подтверждены результаты опытной плавки 608. Применение новой технологии обеспечило измельчение зерна в микроструктуре стали с 3-го до 5–6-го балла и, как следствие, повышение механических и эксплуатационных свойств стали. Предел прочности при растяжении увеличился с 651 до 706,5 МПа на 7,8%. Очень важно, что самая главная характеристика характеризующая устойчивость материала к динамическим нагрузкам ударная вязкость KCU увеличилась с 62,08 до 77,2 Дж/см^2, то есть на 19%. Таким образом, поставленная задача по повышению механических свойств и эксплуатационной надежности редукторов, а следовательно, и комбайнов, выполнена [289].

Выводы по главе 4

В результате проведенных промышленных испытаний установлено, что одним из эффективных путей экономии материальных ресурсов и улучшения служебных свойств ответственных отливок является введение в технологический процесс плавки в печах с кислой футеровкой восстановительного периода с применением дисперсных диффузионных раскислительных смесей РД19П и РД21П и рафинирующей смеси РСУ для внепечной обработки сталей при производстве ответственных сельскохозяйственных, автомобильных, железнодорожных и других отливок, что обеспечивает следующие преимущества:

1. Разработанный компонентный состав дисперсных раскислительных диффузионных смесей РД19П и РД21П во время восстановительного периода способствует принудительному вспениванию шлаков, которые экранируют дуги, что приводит к ускоренному нагреву металла, резкой активизации реакций восстановления из шлака Mn, Fe, а также Si за счет развивающегося кремнийвосстановительного процесса, что позволяет экономить ферросплавы ФС45 и ФМн78 в количестве 4 и 2,4 кг/т жидкого соответственно.

2. Ускоренный нагрев металла за счет экранизации дуг вспененным шлаком способствует сокращению времени плавки на 10 минут, что позволяет экономить электроэнергию в количестве 466,7 кВт/ч на плавку. Кроме того, вспененный шлак предохраняет свод и откосы от прямого излучения, что увеличивает срок их службы.

3. Рафинирование металла с помощью РД позволяет существенно снизить концентрации оксидов железа и марганца в шлаке, FeO в 3,7 раза, с 14,2 до 3,8%, а MnO — в 2,3 раза, с 16,9 до 7,1%, а следовательно, снизить и содержания этих оксидов в металле. Индекс загрязненности стали после обработки РД уменьшился с 2,95 до 1,94 (10^{-3}). У рафинированного металла повысилась жидкотекучесть, что подтвердилось уменьшением времени заполнения форм отливки «кронштейн» с 38 до 31 секунды. Устранен брак по недоливам и неспаям. Уменьшена температура заливки стали на 20 °С, что существенно снизило трудоемкость удаления пригара на отливках.

4. Обработка шлака РД и РСУ уменьшает плотность шлака с 2,95 г/см^3 до 2,71 г/см^3 после обработки РД и до 2,57 г/см^3 после рафинирования РСУ, чему способствуют мелкие пузыри CO, остающиеся в шлаке. Уменьшается и теплопроводность шлака, что дает возможность длительное время выдерживать требуемую температуру заливки стали в ковше под шлаком и разливать плавки без остатков металла в ковше, устранить брак по недоливам и неспаям, а также снизить трудоемкость удаления остатков шлака из ковшей и увеличить срок их службы.

5. Эффективное рафинирование металла в печи РД и внепечная обработка стали РСУ в ковше позволили существенно повысить относительное удлинение стали 20ГЛ с 26,05 до 28,38% и ударную вязкость с 710,6 до 1013,6 кДж/м^2, то есть на 8,21 и 29,2% соответственно, что дало

возможность расширить номенклатуру ответственного железнодорожного литья из сталей 30ГСЛ-Б и 30ГСЛ, выплавляемого в кислых печах, и тем самым удешевить его. Планируется изготавливать самые сложные отливки первой группы корпус автосцепки и тяговый хомут с выплавкой стали в печах с кислой футеровкой.

6. Одним из эффективных путей улучшения служебных свойств отливок «корпус автосцепки» из стали 20ГЛ, выплавленной в кислой печи является внепечная обработка расплава в ковше РСУ в количестве, которая способствует существенному снижению серы в расплаве в среднем с 0,0302 до 0,0204%, то есть на 25,8%. Кроме того, увеличивается σ_T в среднем с 484 до 551 Дж/см^2, то есть на 12%, а σ_B увеличивается с 637 до 713 Дж/см^2, то есть на 11%. Это дает возможность автосцепке выдерживать высокие растягивающие нагрузки и способствует повышению эксплуатационной надежности автосцепного устройства.

7. Применение новой технологии обеспечило повышение механических свойств и эксплуатационной надежности редукторов, а следовательно, и горнодобывающих комбайнов, производимых АО «Анжеромаш». В микроструктуре стали 25ГСЛ измельчилось зерно с 3-го до 5–6-го балла. Предел прочности при растяжении увеличился с 651 до 706,5 МПа на 7,8%. Очень важно, что самая главная характеристика характеризующая устойчивость материала к динамическим нагрузкам ударная вязкость KCU увеличилась с 62,08 до 77,2 Дж/см^2, то есть на 19%.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА СЧ И ВЧ ВЫСОКИХ МАРОК ДЛЯ ОТЛИВОК ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПОСЫЛОК

5.1. В производстве железнодорожных отливок ответственного назначения «клин фрикционный»

Чебоксарский агрегатный завод (ЧАЗ)» внедрил производство отливок «клин фрикционный» из чугуна марки СЧ 30 по техническим условиям ТУ 3183-234-01124323 [37]. Внедрение [263] показало, что механические свойства чугуна и микроструктуры отливок «корпус фрикционный» обеспечиваются ковшовым модифицированием комплексным смесевым модификатором МК21 в количестве 0,08%. Модификатор МК21 соответствовал требованиям ТУ 24.10.12.-001-52044633-2025 [18].

Вместе с тем, РЖД для дальнейшего повышения служебных свойств отливок «клин фрикционный» рекомендует изготавливать отливки из чугуна СЧ35. Многие заводы, в последнее время, осваивают производство отливок из СЧ35 Сравнительные характеристики механических свойств и химического состава чугунов марок СЧ30 и СЧ35 согласно требованиям ТУ 3183-234-01124323 [37] приведены в табл.5.1.

Таблица 5.1

Сравнительные характеристики механических свойств и химического состава чугунов марок СЧ30 и СЧ35

Марка чугуна	Механические свойства		Химический состав, % по массе							
	$\sigma_в$, МПа,	НВ	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
						Не более				
СЧ 30	≥300	197–260	3,0–3,2	1,3–1,9	0,7–1,0	0,2	0,12	0,4	0,4	0,4
СЧ35	≥350	230–275	2,9–3,0	1,2–1,5	0,7–1,0	0,2	0,12	0,4	0,4	0,4

Как видно из данных табл. 5.1, в марке чугуна СЧ35 по сравнению с СЧ30 в первую очередь увеличен предел прочности при растяжении до значений ≥350. Для обеспечения этого показателя резко снижен углеродный эквивалент за счет уменьшения концентраций углерода и кремния в чугуне. Это упрощает получение требуемых механических свойств марки СЧ35, но усложняет задачу обеспечения требуемой микроструктуры чугуна. Микроструктура СЧ35 должна быть следующей: металлическая основа: П, П92; Пд0,3–Пд1,0; цементит: 0–Ц2; Цп2000; графит: ПГф1–ПГф2; ПГд25–ПГд90; ПГр1–ПГр3; ПГ6–ПГ10. Особенно сложно не превысить содержание цементита. В данном случае решающую роль играет эффективное модифицирование чугуна. Состав и количество модификаторов, а также технологию модифицирования предприятие-изготовитель имеет право выбрать самостоятельно.

Большую научно-практическую работу для повышения механических свойств чугуна марки СЧ35 провели специалисты ОАО «ВНИИЖТ». Ими были предложены композиции из легирующих добавок никеля, молибдена и модифицирующих присадок, циркония, бария, кальция, алюминия и технологии их введения в расплав, которые в соотношении с базовыми компонентами чугуна, существенно повлияли на процессы структурообразования литого чугуна, в том числе на форму, размер и дисперсность образующихся ферритно-перлитных, графитных и других структурных составляющих [264–267]. Для модифицирования рекомендуется применять модификатор производства НПП «Технология» Z-GRAPH, в количестве 0,5% от емкости ковша. Z-GRAPH производится на основе кремния (58–65%). В его состав введены комплекс активных грфитизаторов: Zr=6,0–7,0%; Ba=2,5–3,0%; Ca=1,0–1,5% и Al до 1%. Многие заводы при освоении производства СЧ35 для ковшевого модифицирования выбирают Z-GRAPH в количестве 0,5% фракцией 0,8–4 мм [268].

Провели исследования по определению принципиальной возможности применения дисперсного смесевого модификатора МК21 для ковшевого модифицирования при получении СЧ35. Как показали предыдущие исследования, модифицирование расплава модификатором МК21 в количестве 0,08% не позволяло получать марку СЧ35. σ_B достигала значений от 300 до 350 МПа [18]. Поэтому принято решение для получения марки чугуна СЧ35 изменить химический состав чугуна, понизив углеродный эквивалент согласно рекомендациям ТУ3183-234-01124323, а при ковшевом модифицировании увеличивать количество модификатора МК21 до получения требуемых характеристик механических свойств и микроструктуры.

Плавку вели по действующей технологической инструкции. Выпуск осуществлялся в ковш емкостью 6 тонн, затем расплав переливали в разливочный ковш емкостью 500 кг, в котором и осуществлялось модифицирование различными количествами МК21. Металлоемкость форм составила 120 кг. Содержание углерода и кремния в исходном перед модифицированием чугуне уменьшили до 2,6 и до 1,21% соответственно. Химический состав чугуна по ходу плавки приведен в табл. 5.2. Результаты модифицирования приведены в табл.5.3.

Таблица 5.2

Химический состав чугуна

Номер		марка металла	C	Mn	Si	Cr	Cu	Ni	S	P
плавки	пробы		%, по массе							
8/72	1	СЧ35	2,91	0,60	0,41	0,11	0,20	0,10	0,027	0,049
	2		2,82	0,89	0,75	0,11	0,38	0,10	0,026	0,047
	3		2,76	0,90	1,17	0,12	0,41	0,10	0,025	0,050
Окончательная			**2,63**	**0,85**	**1,21**	**0,14**	**0,39**	**0,12**	**0,018**	**0,053**

Таблица 5.3

Результаты модифицирования

№ ковша	$t_з$,°С	Вид модификатора	Кол-во модификатора, кг (%)	Отбел, мм
1	1443	МК21	2,5 (0,5)	20
2	1415	МК21	3 (0,6)	14
3	1407	МК21	3,5 (0,7)	10

Микроструктура и механические свойства отливок приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Микроструктура и механические свойства чугуна

№ ковша	Отбел на пробе, мм	Механические свойства, $\sigma_в$, МПа	Микроструктура		
			Графит	Перлит	Цементит
1	18	370	наклонная стенка: ПГф (1–2) — ПГд (45–180) — ПГр (1, 3, 9) — ПГ (6–10)	П (Ф0), ПД (0,5–1,4)	С углов до 8,8 мм
			вертикальная стенка: ПГф (1–2) — ПГд (45–180) — ПГр (1, 3, 9) — ПГ (6–10)	П (Ф0), ПД (0,5–1,4)	С углов до 18,9 мм
2	12		наклонная стенка: ПГф (1–2) ПГд (45–180) — ПГр (1, 3, 9) — ПГ (6–10)	П (Ф0), ПД (0,5–1,4)	С углов на глубину до 6,1 мм
			вертикальная стенка: ПГф (1–2) — ПГд (45–180) — ПГр (1, 3, 9) — ПГ (6–10)	П (Ф0), ПД (0,5–1,4)	С углов до 15 мм
3	10		наклонная стенка: ПГф (1–2) — ПГд (45–180) — ПГр (1, 3, 9) — ПГ (6–10)	П (Ф0), ПД (0,5–1,4)	С углов до 1,2 мм
			вертикальная стенка: ПГф (1–2) — ПГд (45–180) — ПГр (1, 3, 9) — ПГ (6–10)	П (Ф0), ПД (0,5–1,4)	С углов до 2,4 мм

Из данных табл. 5.2 видно, что механические свойства чугуна соответствуют техническим требованиям марки СЧ35, а микроструктуры образцов, вырезанных из отливок (табл. 5.4), не соответствуют ТУ 3183-234-01124323 по распределению графита и наличию цементита. В структуре наблюдаются междендритный графит ПГр9 (рис. 5.1) и цементит (рис. 5.2)

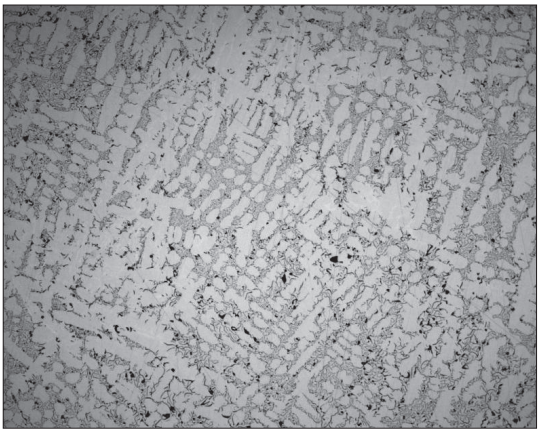


Рисунок 5.1. Междендритный графит в наклонной стенке ПГр 9

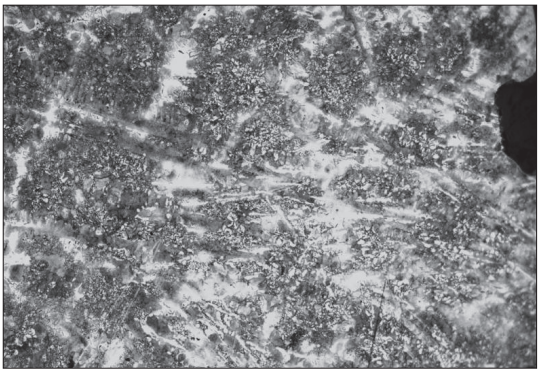


Рисунок 5.2. Цементит в углу наклонной стенки

Таким образом, модификатор МК21 обеспечивает требуемые механические свойства СЧ35, но не обеспечивает требуемую микроструктуру чугуна в отливках.

При изготовлении смесевых модификаторов для устранения цементита в структуре чугуна важную роль играет компонент, кристаллографические параметры которого, максимально тождественны графиту, выделяющемуся в жидком чугуне при кристаллизации. Таким компонентом является углерод, основная составляющая графита. Поэтому для устранения цементита в микроструктуре чугуна увеличили массовую долю графита в модификаторе, для чего применили смесь МК91. Для удешевления модификатора изменили компоненты смеси. Использовали аспирационную пыль, которая возникает при дроблении ферросилиция и аспирационную пыль, образующуюся при механической обработке графитизированных электродов. Аспирационные

пыли вышеперечисленных компонентов сопоставимы по дисперсности, химическому составу и минимальному содержанию вредных примесей.

Первый ковш модифицировали МК91 (%масс С=89–91, Si=9–11) в количестве 0,4% (2 кг) от металлоемкости ковша. Во второй и третий ковш присаживали увеличенное количество модификатора 0,5 и 0,6% (2,5 и 3 кг) МК91.

Учитывая высокую эффективность позднего модифицирования чугуна [163], применили комплексное модифицирование чугуна в ковше и в литейной форме. Четвертый ковш модифицировали МК91 в количестве 0,4% (2 кг) от металлоемкости ковша. При заливке форм с 4-го ковша в литейные формы присаживали модификатор МКкск19 в увеличивающихся количествах: 60 г (~0,05% от металлоемкости формы); 120 г (~0,1%), 180 г (~0,15%) и 240 г (~0,2%). Модификатор засыпался в зумпф формы через литниковую чашу. Результаты модифицирования приведены в табл. 5.5–5.7.

Таблица 5.5

Химический состав плавки № 33

Химический состав, % по массе							
C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	S	P
2,59	0,70	1,33	0,15	0,13	0,19	0,065	0,040

Таблица 5.6

Результаты модифицирования

№ ковша	$t_з$,°C	Вид модификатора	Кол-во модификатора, кг (%)	Отбел, мм
1	1433	МК91	2,0 (0,4)	18
2	1420	МК91	2,5 (0,5)	12
3	1407	МК91	3 (0,6)	8
4	1395	МК91+МКкск19	2,0 (0,4) + МКкск19	16

Таблица 5.7

Результаты модифицирования

№ ковша	Отбел на пробе, мм	Механические свойства, $\sigma_в$, МПа	Микроструктура		
			Графит	Перлит	Цементит
1	18	375	наклонная стенка: ПГф (1–2) — ПГд (45–180) — ПГр (1, 3, 9) — ПГ (6–10)	П (Ф0), ПД (0,5–1,4)	С углов до 7,8 мм
			вертикальная стенка: ПГф (1–2) — ПГд (45–80) — ПГр (1, 3, 9) — ПГ (6–10)	П (Ф0), ПД (0,5–1,4)	С углов до 16,7 мм

№ ковша	Отбел на пробе, мм	Механические свойства, $\sigma_в$, МПа	Микроструктура		
			Графит	Перлит	Цементит
2	12		наклонная стенка: ПГф (1–2) — ПГд (45–180) — ПГр (1, 3, 9) — ПГ (6–10)	П (Ф0), ПД (0,5–1,4)	С углов на глубину до 4,1 мм
			вертикальная стенка: ПГф (1–2) — ПГд (45–180) — ПГр (1, 3, 9) — ПГ (6–10)	П (Ф0), ПД (0,5–1,4)	С углов до 11 мм
3	8		наклонная стенка: ПГф (1–2) — ПГд (45–180) — ПГр (1, 3) — ПГ (6–10)	П (Ф0), ПД (0,5–1,4)	С углов 0 мм
			вертикальная стенка: ПГф (1–2) — ПГд (45–180) — ПГр (1, 3) — ПГ (6–10)	П (Ф0), ПД (0,5–1,4)	С углов до 0 мм
4 1-я форма	16		наклонная стенка: ПГф (1–2) — ПГд (45–180) — ПГр (1, 3, 9) — ПГ (6–10)	П (Ф0), ПД (0,5–1,4)	С углов до 4,1 мм
			вертикальная стенка: ПГф (1–2) — ПГд (45–180) — ПГр (1, 3, 9) — ПГ (6–10)	П (Ф0), ПД (0,5–1,4)	С углов до 6,7 мм
4 2-я форма			наклонная стенка: ПГф (1–2) — ПГд (45–180) — ПГр (1, 3, 9) — ПГ (6–10)	П (Ф0), ПД (0,5–1,4)	С углов до 2,1 мм
			вертикальная стенка: ПГф (1–2) — ПГд (45–180) — ПГр (1, 3, 9) — ПГ (6–10)	П (Ф0), ПД (0,5–1,4)	С углов до 4,7 мм
4 3-я форма			наклонная стенка: ПГф (1–2) — ПГд (45–180) — ПГр (1, 3) — ПГ (6–10)	П (Ф0), ПД (0,5–1,4)	С углов до 1,3 мм
			вертикальная стенка: ПГф (1–2) — ПГд (45–180) — ПГр (1, 3, 9) — ПГ (6–10)	П (Ф0), ПД (0,5–1,4)	С углов до 2 мм
4 4-я форма			наклонная стенка: ПГф (1–2) — ПГд (45–180) — ПГр (1, 3, 9) — ПГ (6–10)	П (Ф0), ПД (0,5–1,4)	С углов 0 мм
			вертикальная стенка: ПГф (1–2) — ПГд (45–180) — ПГр (1, 3, 9) — ПГ (6–10)	П (Ф0), ПД (0,5–1,4)	С углов 0 мм

Как видно из результатов табл. 5.7, модифицирование в ковше модификаторами МК91 в количествах 0,6%, либо комплексное модифицирование чугуна в ковше в количестве 0,4% МК91 и в форме модификатором МКкск19 в количестве 0,1% позволяет стабильно получать отливки «клин фрикционный» из СЧ35 без избыточного цементита в микроструктуре чугуна и обеспечивать форму, размер и дисперсность образующихся ферритно-перлитных, графитных и других структурных составляющих в микроструктуре чугуна. Установлено, что смесевой

модификатор МК91, изготовленный из аспирационных пылей, которые возникают при дроблении ферросилиция и образующийся при механической обработке графитизированных электродов, достаточно результативен и не уступает материалу, изготовленному из качественных материалов дисперсного графита, подвергнутого специальной подготовке, и КСМ, полученного при производстве органогалогенсиланов. На основании проведенных исследований получен патент модифицирующая смесь для чугуна [220].

5.2. Исследования по получению отливок «клин фрикционный» из ВЧ120

РЖД для повышения эксплуатационной надежности отливок «клин фрикционный» рекомендует также изготовление отливки «клин фрикционный» из высокопрочного чугуна. ТУ 3183-163-01124323 [270] предусматривает жесткие требования к качеству фрикционных клиньев из высокопрочного чугуна. В технических условиях регламентированы требования к химическому составу высокопрочного чугуна (табл. 5.8), механическим свойствам в литом (табл. 5.9) и термообработанном состояниях (табл. 5.10).

Таблица 5.8

Химический состав высокопрочного чугуна

Химический состав, % по массе								
C	Si	Mn	Cu	Mg	P	S	Cr	Ni
					Не более			
3,2–3,7	1,9–2,9	0,3–0,7	0,7–1,0	0,04–0,08	0,07	0,02	0,15	0,3

Таблица 5.9

Механические свойства высокопрочного чугуна «клин фрикциоый» в литом состоянии

Вид образца	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	НВ
	Не менее			
d 10 мм, l расч. = 50 мм	500	320	2	180–302

Таблица 5.10

Механические свойства металла фрикционного клина после термической обработки

Вид образца	НВ	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	КС, кДж/м^2
		Не менее			
d 10 мм, l расч. = 50 мм	388–444	1200	850	1	300

ВНИИЖТ на основании большого количества экспериментов при отливке фрикционных клиньев из ВЧ на разных предприятиях были выявлены оптимальные требования к микроструктуре отливок в литом состоянии [265, 267].

Металлическая матрица: — металлическая основа — перлит (%) П.П92; — дисперсность перлита (мкм) — ПД 0,5; — содержание цементита (%) — Ц2;

Для получения перлитной структуры в литом состоянии и, соответственно, однородной бейнитной структуры после изотермической закалки в высокопрочный чугун необходимо вводить перлитостабилизирующие элементы — никель, медь. Хотя никель и медь являются элементами-аналогами по производимому эффекту, использование меди в пределах 0,7–1,0% позволяет в более широких пределах скоростей охлаждения получать перлитную структуру и повышать износостойкость. Кроме того, медь значительно дешевле, доступнее и технологичнее, чем Ni в процессе производства чугуна [267].

Очень эффективен для легирования ВЧ молибден в количестве до 0,6%. До этой концентрации он практически не влияет на склонность чугуна к отбелу, не образует собственных карбидов, хотя и является карбидообразующим элементом. Распределяясь между эвтектоидными цементитом и ферритом, молибден в широком интервале температур эффективно повышает прочность чугуна. С увеличением содержания молибдена повышается твердость без ухудшения обрабатываемости и возрастает сопротивление износу. Наиболее эффективно прочность повышается при комплексном легировании молибденом в сочетании с хромом, никелем, медью [268].

Проведенный анализ качества фрикционных клиньев из высокопрочного чугуна показывает, что для стабильного образования шаровидного графита и получения заданного уровня механических свойств необходимо соблюдать соотношение содержания $Mg_{ост}S>3,0$ [7].

Поэтому предпочтительным является повышенное содержание магния в чугуне, равное 0,04–0,08%. При содержании магния ниже 0,045 и выше 0,12% образуется вермикулярный графит вместо шаровидного. Кроме того, необходимо низкое содержание серы в исходном чугуне для стабильного получения ВЧ120 (<0,01%).

При проведении опытных плавок использовали преимущества электродуговой плавки. Для плавки применяли качественные шихтовые материалы. Плавили полусинтетический чугун. Завалка состояла из рельсовой стали 35%, чугуна ПЛ 1 — 15%, чугун ПВК — 50%. В завалку добавляли никель Н3 и медь М1. По расплавлению получили, %: С — 3,54; Mn — 0,29; Si — 0,50; Cr — 0,034; Ni — 0,43; Cu — 0,62; S — 0,0141; P — 0,018; Al — 0,008.

Повысили концентрацию кремния в чугуне до 1,6–1,8% присадками в печь ФС45.

Затем использовали преимущества ДСП и произвели диффузионное раскисление шлака и чугуна добавкой РДА из расчета 4 кг/тж. для глубокой

десульфурации расплава и снижения оксидов в расплаве. Произвели нагрев чугуна, после чего выпустили расплав при температуре 1550 °С.

Для сфероидизирующего модифицирования использовали сэндвич-процесс в чайниковом ковше емкостью 8 т. В реакционную камеру ковша загружали материалы в следующем порядке (% по массе): графитизирующий модификатор МК21 0,3; сфероидизирующий модификатор «Сферомаг 611» — 1,8, стальная дробь — 1,3. Выпуск расплава сопровождался пироэффектом. После выпуска металла перед разливкой выдерживали расплав в ковше до окончания барботажа. Затем ковш подали на разливочный стенд. Для разливки чугуна использовали разливочный стенд емкостью 500 кг. Раздаточный и разливочный ковши предварительно разогревались до 700 °С.

При наполнении разливочного ковша на 1/3 под струю металла отдавали 0,2% МК21. Производился замер температур и отбор проб металла на химический состав и механические свойства. Пробы отбирались из 3-го ковша. Образцы изготавливались из клинообразных проб по ГОСТ 977. Температура равнялась 1430 °С.

Химический состав чугуна приведен в табл. 5.11. Определили механические свойства и микроструктуру ВЧ в литом состоянии. Образцы изготавливались из клина 3-й формы. Результаты представлены в табл. 5.11.

Таблица 5.11

Химический состав чугуна

	Концентрации элементов, % по массе									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S	P	Al	Mg
Печь	3,55	1,77	0,32	0,04	0,3	0,7	0,009	0,025	0,02	0,01
3-й ковш	3,46	2,45	0,33	0,042	0,29	0,72	0,006	0,025	0,021	0,054

Таблица 5.12

Механические свойства высокопрочного чугуна фрикционного клина в литом состоянии

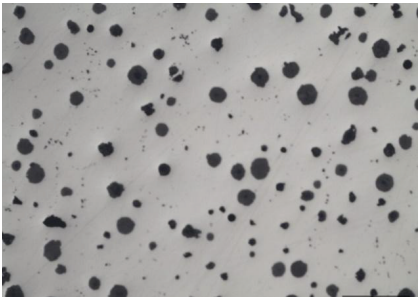
Вид образца	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	НВ
d 10 мм, l расч. = 50 мм	750	480	0	309

Из данных табл. 5.11 видно, что концентрация серы в чугуне после диффузионного раскисления снизилась с 0,041 до 0,09%, то есть на 36%, что свидетельствует о высокой эффективности РДА.

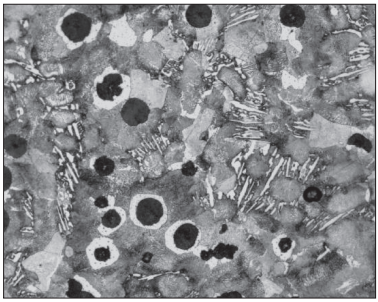
Из данных табл. 5.11, 5.12, химический состав чугуна соответствует требованиям НТД. Прочностные характеристики полученного ВЧ соответствовали марке ВЧ70. Однако относительное удлинение чугуна

равнялось нулю, что не соответствует требованиям ГОСТ 977. Также была завышена и твердость чугуна, которая равнялась 309 НВ.

Это связано с тем, что в структуре чугуна присутствовал цементит до 10% (рис. 5.3).



а ×100



б ×100

Рисунок 5.3. Микроструктура высокопрочного чугуна:
а — не травлено: ШГф4 преобладает, ШГф5, ШГд45, ШГд90; ШГр1; ШГ10;
б — травлено, нитал: перлит пластинчатый П75, феррит Ф15, цементит Ц10

Произвели изотермическую закалку ВЧ, для чего использовали рекомендации исследователей, приведенные в работах [271–274]. Отливки и клиновую пробу нагрели в печи до температуры 950 °С и выдержали 2 до полной аустенизации и устранения цементита в структуре. Затем проводили закалку в расплаве солей со из смеси калиевой и натриевой селитр, взятых в соотношении 1:1, при температуре солевого расплава 300 °С с выдержкой 2 часа и последующим охлаждением на воздухе.

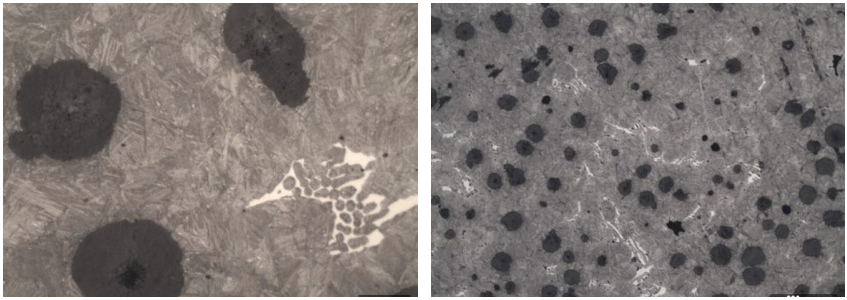
Механические свойства закаленного ВЧ приведены в табл. 5.13.

Таблица 5.13

Механические свойства высокопрочного чугуна фрикционного клина в закаленном состоянии

Вид образца	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	НВ
d 10 мм, l расч. = 50 мм	1164	810	0	445

Как видно из данных табл. 5.13, механические свойства не соответствуют марке чугуна ВЧ120 по всем параметрам. Это объясняется тем, что нагрев и выдержка чугуна при температуре 950 °С устранили цементит в микроструктуре бейнитного чугуна лишь частично с 10 до 4% (рис. 5.4).



а ×100 б ×500

Рисунок 5.4. Микроструктура закаленного чугуна:
а — нижний бейнит, цементит Ц4; б — нижний бейнит, цементит Ц4

Для устранения этого недостатка, недопущения образования цементита в структуре чугуна при графитизирующем модифицировании в раздаточном и разливочном ковшах применили дисперсный модификатор МК91 вместо МК21 в тех же количествах (0,3 и 0,2% в раздаточный и разливочный ковши соответственно.

Провели две плавки. Плавки и модифицирование вели по вышеописанной технологии. Химические состав плавок, механические свойства и микроструктуры в литом состоянии представлены в табл. 5.14, 5.15 и на рис. 5.5.

Таблица 5.14

Химические составы плавок

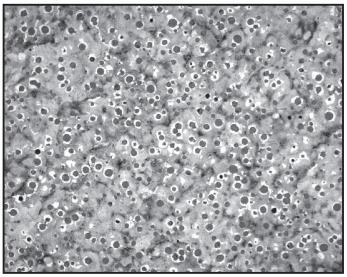
	Концентрации элементов, % по массе									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S	P	Al	Mg
	Плавка 9/392									
Печь	3,45	1,66	0,31	0,036	0,28	0,73	0,01	0,023	0,02	0,009
3-й ковш	3,40	2,43	0,34	0,038	0,29	0,72	0,006	0,022	0,02	0,056
	Плавка 9/393									
Печь	3,59	1,82	0,31	0,038	0,27	0,7	0,009	0,021	0,021	0,009
3-й ковш	3,54	2,57	0,32	0,038	0,29	0,71	0,005	0,020	0,022	0,058

Таблица 5.15

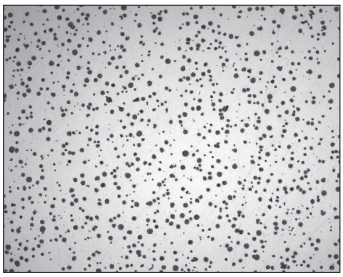
Механические свойства высокопрочного чугуна фрикционного клина в литом состоянии

№ плавки	Вид образца	σ_B, МПа	σ_T, МПа	δ, %	НВ
9/392	d 10 мм, l расч. = 50 мм	810	480	2,5	289
9/393	d 10 мм, l расч. = 50 мм	780	480	3	245

Как видно из табл. 5.14, химические составы плавок соответствуют требованиям НТД. Механические свойства чугуна в литом состоянии плавки 9/392 (табл. 5.15) соответствуют марке чугуна ВЧ80, а плавки 9/393 — марке ВЧ70.



а



б

Рисунок 5.5. Микроструктура высокопрочного чугуна в литом состоянии
а — не травлено: ШГф4 — преобладает, ШГф5, ШГд25 — 45, ШГр1; ШГ12;
б — травлено, нитал: перлит пластинчатый П82, феррит Ф8

Благодаря большей графитизирующей способности дисперсного МК91 за счет содержания в нем большего количества активного углерода получена более благоприятная структура ВЧ (рис. 5.5).

Как видно из рис. 5.5а, графитные включения в структуре получились мельче, а количество их больше, чем при модифицировании МК21, что подтверждает более высокую графитизирующую способность МК91. В результате отбел в литой структуре ВЧ отсутствовал (рис. 5.5б) и механические свойства получились выше, чем при использовании модификатора МК21.

Произвели изотермическую закалку ВЧ. Отливки и клиновые пробы нагрели в печи до температуры 950 °С до полной аустенизации. Закалку проводили в расплаве солей при 300 °С с выдержкой 2 часа и последующим охлаждением на воздухе.

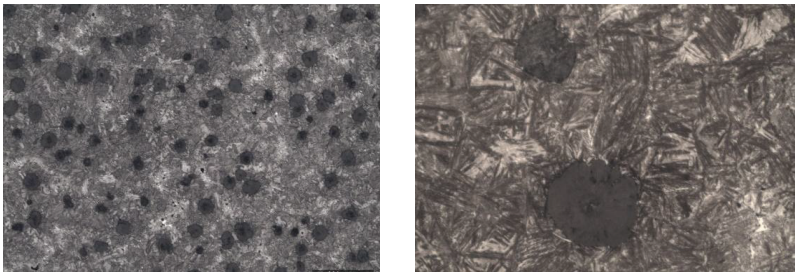
Механические свойства закаленного ВЧ приведены в табл. 5.16.

Таблица 5.16

Механические свойства высокопрочного чугуна фрикционного клина в закаленном состоянии

№ плавки	Вид образца	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	НВ
9/392	d 10 мм, l расч. = 50 мм	1409	920	2	461
9/393	d 10 мм, l расч. = 50 мм	1308	850	4	388

Как видно из данных табл. 5.16, механические свойства соответствуют марке чугуна ВЧ120 по всем параметрам. Это объясняется тем, что изотермическая закалка позволила получить микроструктуру шаровидного графита с металлической матрицей нижнего бейнита (рис. 5.6).



×100 ×500

Рисунок 5.6. Микроструктура закаленного чугуна, нижний бейнит

Таким образом, установлена принципиальная возможность стабильно получать отливки клиньев фрикционных из ВЧ120 комплексным модифицированием графитизирующим дисперсным модификатором МК91 и сфероидизирующим «Сферомаг 611».

5.3. Преимущества комплексного графитизирующего модифицирования СЧ35 и ВЧ120

Для резкого повышения результатов графитизирующего модифицирования необходимо проводить комплексное модифицирование чугуна в ковше модификаторами Z-GRAPH + МК, что позволит усилить графитизацию за счет дополнительного благоприятного воздействия дисперсного графита в составе разработанного МК на микроструктуру, механические и служебные свойства СЧ35. Z-GRAPH, как указывалось выше, содержит в своем составе активные графитизаторы Si, Zr, Ca, Ba. Однако в нем отсутствует активный углерод, являющийся наиболее сильным графитизатором. Поэтому необходимо произвести комплексное графитизирующее модифицирование чугуна в ковше модификаторами Z-GRAPH и МК. В качестве МК предпочтительней выбрать МК82. В составе МК82 находится 19–21% кальций-стронциевого карбоната (КСК). При ковшевом модифицировании при температуре 950 °С карбонаты Ca и Sr, находящиеся в составе МК82 форсированно диссоциируют с выделением газа CO_2, который в области высоких температур, в присутствии твердого углерода, полностью превращается в монооксид углерода. Образующиеся газы усиливают турбулентность потока чугуна и увеличивают усвояемость модификаторов. Кроме того, образующийся CO вытесняет из зоны реакции в ковше кислород воздуха, что предохраняет графитизаторы от окисления. Особенно это важно при получении модифицированием в ковше

высокопрочного чугуна Пары магния, сублимирующего при 1105 °С, оказываются в восстановительной атмосфере СО и не окисляются. В результате пироэффект и дымовыделение отсутствуют. Они задерживаются по времени, а усвоение магния увеличивается. Подтверждение представлено ниже.

Выводы по главе 5

1. В настоящее время для повышения эксплуатационной надежности отливок «клин фрикционный» требует изготовления их из чугуна марки СЧ35.
2. Установлено, что модифицирование расплава в ковше комплексным модификатором МК91 в количестве 0,6% от металлоемкости ковша позволяют стабильно получать чугун марки СЧ35 и отливки «клин фрикционный» без отбела.
2. Установлено, что двойное модифицирование расплава в ковше модификатором МК91 в количестве 0,4% от металлоемкости ковша и внутри формы дисперсным МКкск19 в количестве 0,1% от металлоемкости формы позволяют стабильно получать чугун марки СЧ35 и отливки «клин фрикционный» с требуемой микроструктурой.
3. Установлено, что двойное модифицирование расплава в раздаточном ковше модификаторами «Сферомаг 611» и МК91 в количествах 1,8 и 0,3% от металлоемкости ковша и в разливочном ковше модификатором МК91 в количестве 0,2% позволяют после изотермической закалки получать чугун марки ВЧ120 для отливок «клин фрикционный» с шаровидным графитом и металлической матрицей нижнего бейнита.

ГЛАВА 6. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОИЗВОДСТВО

Задачу повышения эксплуатационной надежности ответственных стальных и чугунных отливок в промышленных условиях решали путем внедрения разработанных технологических процессов с использованием созданных дисперсных материалов в производство на предприятиях РФ. Для подтверждения результативности новых технологий широко использовали возможности статистической обработки данных и регрессионного анализа в пакете STATISTICS&ANALISIS v.12.0. Stat Soft, Inc [177, 178]. Ниже приведены результаты внедрений разработанных технологических процессов и материалов.

6.1. Внедрение технологического процесса диффузионного раскисления сталей с применением РДА

Проведенные исследования, результаты которых представлены в главе 3, позволили установить преимущества разработанного способа диффузионного раскисления стали в электродуговых печах, включающего использование для раскисления шлака дисперсной раскислительной смеси РДА, перед применяемой на заводе раскислительной смесью. Расход РДА при производстве ответственной отливки для тележки грузовых вагонов «балка надрессорная» уменьшился по сравнению с заводской смесью на 40% с 4,24 до 2,37 кг/т жидкого за счет рационального подбора компонентов и их дисперсности. РДА раскислял шлак значительно быстрее и эффективнее, чем заводская смесь. Время восстановительного периода уменьшилось на 15 минут. При использовании новой технологии в экспериментальных плавках средние значения KCV^{-60} выросли с 299,9 до 374,6 кДж/м^2, то есть на 20%. Очень важно, что все значения KCV^{-60} экспериментальных плавок (табл. 3.17) были выше среднего значения KCV^{-60} (табл. 3.13) [210, 18]. Это позволило ВНИИЖТ рекомендовать к внедрению новую «балку надрессорную» в производстве инновационных тележках грузоподъемностью 25 тс. Вышесказанное дало возможность внедрить РДА в технологический процесс выплавки сталей 20ГФЛ.

Вместе с тем все железнодорожное стальное литье для грузовых вагонов, производимое на заводе, относится к отливкам особо ответственного назначения, работающих при циклических и динамических нагрузках. На заводе производится большая номенклатура стальных железнодорожных отливок из стали 20ГФЛ массой от 1 до 100 кг, таких как отливки для начинки корпуса автосцепки СА-3 (замкодержатель, замок, подъемник замка, валик подъемника, предохранитель замка); кронштейны, корпуса, крышки и ряд других. Они формуются на АФЛ № 2. При выплавке стали для производства этих отливок внедрено диффузионное раскисление с применением РДА.

Для подтверждения эффективности новой технологии произвели статистическую обработку химического состава сталей и KCV^{-60} стали 20ГФЛ.

Исследовали 174 плавки сталей, выплавленных с использованием РДА. Результаты статистической обработки сталей после внедрения представлены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Результаты статистической обработки
качественных показателей сталей после внедрения

	Кол. набл.	Среднее	Минимум	Максим.	Дисперсия	Ср. кв. откл.	Коэф. вар. V, %.
C, %	174	0,2030	0,1500	0,2500	0,000	0,01475	7,26738
Mn, %	174	1,2132	0,9700	1,4600	0,006	0,07918	6,52647
Si, %	174	0,3620	0,2100	0,5600	0,004	0,06233	17,21868
V, %	174	0,06156	0,046000	0,07600	0,000023	0,004783	7,769325
S, %	174	0,0102	0,0075	0,0149	0,00	0,00179	16,690
P, %	174	0,0141	0,008000	0,02400	0,000008	0,002816	19,98584
Al, %	174	0,0299	0,0160	0,0560	0,000	0,00401	13,43271
Ca, %	174	0,0028	0,0022	0,0038	0,000	0,00029	10,35941
KCV^{-60}, кДж/м^2	174	380,840	210,0000	450,000	2177,111	46,6595	12,11581

Результаты сравнили со статистическими показателями плавок сталей 20ГФЛ, проведенных до внедрения с использованием традиционной раскислительной смеси (табл. 3.13).

Как видно из данных табл. 3.13 и 6.1, усредненный химический состав сталей до и после внедрения соответствует рекомендуемому ГОСТ 32400. Элементы в стали, которые обеспечивают сталевары добавками ферросплавов расчетным путем, сопоставимы и достаточно однородны как до, так и после внедрения. Наиболее стабильными получаются содержания углерода и марганца в сталях ($\mathbf{V^C}$=6,42–7,27%; $\mathbf{V^{Mn}}$=6,52–6,77%). Следует отметить, что концентрации фосфора в сталях находятся на низком уровне как до, так и после внедрения (0,0148 и 0,0141% (табл. 3.13, 6.1), что свидетельствует о качественно проводимых окислительных периодах плавок. В целом химический состав стали 20ГФЛ свидетельствует о высокой профессиональной подготовке сталеваров и удовлетворительной технологической дисциплине на участке плавки. Очень важно, что применение РДА способствовало активизации процесса десульфурации. Концентрация серы уменьшилась с 0,0136 до 0,0102%, то есть на 25%. Микроструктура стали после внедрения стала чище по неметаллическим включениям. Индекс загрязненности в среднем уменьшился с 1,74 до 1,35 (10^{-3}). Это позволило обеспечить высокие механические свойства стали. Среднее значение KCV^{-60} до внедрения равнялось 299,77 кДж/м^2, а после внедрения повысилось до 380,84, что на 21,3% выше. Но очень важно, что выросла и однородность этого показателя. Коэффициент вариации до внедрения технологии равнялся 25,97%, а после внедрения 12,12 (табл. 3.13 и 6.1).

Таким образом, внедрение позволило резко повысить эксплуатационную надежность не только отливок «рама боковая» и «балка надрессорная», но и другой номенклатуры стального железнодорожного литья. На заводе создали инновационную тележку с нагрузкой на ось тележки 25 тс [282].

Рассчитали ожидаемый экономический эффект от внедрения РДА.

6.1.1. Расчет ожидаемого экономического эффекта от внедрения раскислительной смеси алюмосодержащей (РДА)

Экономический эффект образуется за счет разницы в затратах на материалы, применяемых на заводе при диффузионном раскислении стали 20ГФЛ и РДА.

Исходные данные для расчета

Таблица 6.2

Нормы расхода материалов для диффузионного раскисления стали на одну тонну годного литья по существующему технологическому процессу

Наименование материала	Нормы расхода для сталей 20ГФЛ,		Цена материала, руб/кг
	%	кг	
Ферросилиций, ФС75	0,21	3,15	84,86
Алюминиевая крупка, АВ87	0,09	1,36	125,76
Коксовая мелочь, КМ1, КМ2*	0,34	5,1	13,00
Концентрат плавикошпатовый ФК85*	0,66	9,98	18,5

* Принято решение КМ1 и ФК85 не исключать из норм расхода. Из норм исключаются только ФС75 и АВ87.

Таблица 6.3

Расход материалов для диффузионного раскисления стали на одну тонну годного литья по предлагаемому технологическому процессу

Наименование материала	Нормы расхода для сталей 20ГФЛ, 20ГЛ		Цена материала, руб/кг
	%	кг	
Раскислитель диффузионный РД	0,13	2,4	65,8
Флюс разжижитель шлака РШ	0,066	1	13

Таблица 6.4

Дополнительные затраты на ранее наведение шлака
за счет отдачи флюса РШ в завалку

Наименование материала	Нормы расхода для сталей 20ГФЛ, 20ГЛ		Цена материала, руб/кг
	%	кг	
Флюс разжижитель шлака РШ	1,66	2,5	13

Затраты на материалы на одну тонну годного литья для диффузионного раскисления стали до внедрения равны

$$З_1=К_{ФС75}\cdot Ц_{ФС75} + К_{АВ87}\cdot Ц_{АВ87}=3,15\cdot 84,86 + 1,36\cdot 125,76= =267,31+232,6=499,91 \text{ руб/т},$$

где $К_{ФС75}$, $К_{АВ87}$ — количество ФС75 и АВ87 кг/т
$Ц_{ФС75}$, $Ц_{АВ87}$ — цены материалов, руб.

Затраты на РДА на одну тонну годного литья для диффузионного раскисления стали после внедрения равны $З_2=К_{РДА}\cdot Ц_{РДА}=2,5\cdot 86,9= =217,25$ руб/т.

Тогда экономический эффект равен $Э=(З_1 — З_2)\ П=8\ 479\ 800$ руб.,
где П — программа выпуска литья, тонн.

Уточненный экономический эффект от внедрения, выполненный предприятием в ценах 2024 года, составил 5 683 000 рублей.

6.2. Внедрение разработанных технологий и материалов при выплавке сталей 110Г13Л методом переплава

В АО «Керченский металлургический завод» внедрили производство особо ответственных железнодорожных отливок «крестовины железнодорожные» из стали 110Г13Л методом переплава. Получать необходимый уровень механических свойств требуемых ГОСТ 7370 позволило использование разработанного и запатентованного технологического процесса. При проведении плавок методом переплава успешно использовали три направления совершенствования выплавки стали, результативность которых теоретически освещена в главе 2 и практически подтверждена в главе 3. При выплавке стали в завалку совместно с известняком отдавали РШ в количестве 5 кг/т для раннего наведения шлака, при диффузионном раскислении интенсифицировали процесс использованием РДА в количестве 6 кг/т и дополнительно рафинировали металл внепечной обработкой расплава в ковше РСУ в количестве 5 кг/т. На первом этапе применение внедренной технологии дало возможность переплавить в полном объеме накопившиеся за несколько лет брак и возврат стали 110Г13Л. Затем плавки методом переплава стали проводить по мере накопления возврата и

брака достаточного для проведения плавки. Количество плавок методом переплава составляет 25–30% от общего числа плавок. Остальные 70–75% плавок проводят методом окисления. При проведении плавок методом окисления РШ завалку не отдавали. Внепечную обработку стали в ковше РСУ не проводили. Для диффузионного раскисления использовали РДА в количестве 4 кг/т.

Произвели статистическую обработку качественных показателей стали. За месяц работы цеха было произведено 82 плавки, выплавленных с использованием окислительного периода и 20 плавок методом переплава Результаты представлены в табл. 6.5, 6.6.

Таблица 6.5

Результаты статистической обработки сталей 110Г13Л выплавленных методом окисления за месяц работы цеха

	Кол. набл.	Среднее	Минимум	Максим.	Дисперсия	Ср.кв. откл.	Коэф. вар., V, %
t, °C	82	1474,75	1440,000	1490,00	138,828	11,7825	0,79895
C	82	1,204	1,100	1,280	0,0014	0,03763	3,12631
Mn	82	14,269	12,410	15,250	0,3130	0,55951	3,92109
Mn/C	82	11,862	10,698	12,923	0,2264	0,47586	4,01162
Si	82	0,570	0,410	0,750	0,0054	0,07379	12,95047
P	82	0,037	0,024	0,060	0,0001	0,00718	19,54147
S	82	0,001	0,001	0,001	0,0000	0,00000	0,00000
Al	82	0,013	0,003	0,027	0,0000	0,00558	43,13088
Cr	82	0,084	0,050	0,190	0,0008	0,02797	33,28899
V	82	0,023	0,020	0,040	0,0000	0,00489	21,22094
FeO	82	0,811	0,290	1,570	0,1136	0,33707	41,57612
MnO	82	2,308	0,470	7,000	1,0361	1,01791	44,10958
σ_B, МПа	82	91,410	76,400	99,600	31,2342	5,58876	6,11396
σ_T, МПа	82	48,709	46,000	49,000	0,3457	0,58799	1,20715
δ, %	82	37,309	21,300	48,300	39,0517	6,24913	16,74987
Ψ, %	82	31,602	20,500	54,900	29,0064	5,38576	17,04223
KCU,	82	29,651	21,100	36,900	10,0339	3,16763	10,68297
Группа качества	82	1,512	1,000	3,000	0,3517	0,59304	39,21743

Таблица 6.6

Результаты статистической обработки сталей 110Г13Л выплавленных методом переплава за месяц работы цеха

	Кол. набл.	Среднее	Минимум	Максим.	Дисперсия	Ср.кв. откл.	Коэф. вар., V, %
t, °C	20	1474,00	1450,000	1490,00	180,5263	13,436	0,91153
C	20	1,204	1,160	1,280	0,0008	0,0281	2,34009
Mn	20	14,487	13,530	15,790	0,3931	0,6269	4,32756
Mn/C	20	12,032	11,098	13,269	0,3018	0,5493	4,56593
Si	20	0,534	0,380	0,760	0,0082	0,0904	16,92520
P	20	0,043	0,035	0,050	0,0000	0,0045	10,59148
S	20	0,001	0,001	0,001	0,0000	0,0000	0,00000
Al	20	0,012	0,002	0,024	0,0000	0,0061	51,89594
Cr	20	0,110	0,060	0,240	0,0017	0,0414	37,54063
V	20	0,026	0,020	0,030	0,0000	0,0048	18,46643
FeO	20	0,871	0,430	1,290	0,0779	0,2791	32,07130
MnO	20	2,325	0,980	5,210	1,1747	1,0838	46,60719
σ_B, МПа	20	94,375	82,200	99,300	18,8451	4,3411	4,59984
σ_T, МПа	20	48,830	47,600	49,000	0,1780	0,4219	0,86402
δ, %	20	41,530	29,600	52,500	28,4391	5,3328	12,84090
Ψ, %	20	33,175	29,600	39,400	6,64	2,5772	7,7685
KCU,	20	29,280	22,600	34,500	10,7354	3,2764	11,19019
Группа качества	20	1,200	1,000	2,000	0,1684	0,4103	34,19928

Как видно из данных табл. 6.5, 6.6, концентрации химических элементов в сталях, выплавленных различными способами, сопоставимы. Очень важно, что концентрации вредных оксидов FeO и MnO в шлаках оказались на низком уровне и близки по значениям при плавках с окислением и переплавом. Суммы их (3,196 и 3,119%) были существенно ниже рекомендуемых 5%. Это позволило получить высокие механические свойства сталей. В среднем показатели механических свойств для отливок «крестовины железнодорожные», выплавленных методами окисления и переплава, соответствовали 1-й группе качества. Брака отливок по механическим свойствам не было. Таким образом, подтверждено, что разработанный способ выплавки стали 110Г13Л методом переплава обеспечивает необходимую эксплуатационную надежность отливок. Внедрение прогрессивной технологии позволило обеспечить экономический эффект 48 млн руб. в ценах 2024 года.

В АО «Оскольский завод металлургического машиностроения» подтвердили теоретические предпосылки продуктивности инновационной технологии выплавки марганцовистой стали методом переплава [239]. Во время диффузионного раскисления использовали РДА в количестве 4 кг на тонну жидкого. РДА взамен молотого ФС75. РДА оказался значительно

результативнее молотого ФС65 и дешевле последнего, не требовал подготовки к использованию и облегчал контроль за рациональным его расходованием. Кроме того, в технологическом процессе использовали флюс разжижитель шлака — РШ, который подавали на подину печи и равномерно распределяли по поверхности извести перед загрузкой металлозавалки в количестве 5 кг на тонну жидкого. Это способствовало раннему наведению шлака. В результате уменьшили период плавления шихты на 10 минут, и обеспечили экономию электроэнергии в количестве 59, 9 кВт/тж, уменьшили угар марганца и железа во время плавления, По расплавлению получали жидкоподвижный шлак, а также экономили ферросплавы. И, наконец, для ковшевой обработки дополнительно использовали РСУ, в количестве 5 кг на тонну жидкого. Это позволило образующимся в процессе выпуска расплава каплям шлака аккумулировать сульфиды и пленообразные оксиды, очищать металл, а также дегазировать его, повышать тем самым его механические свойства. Технология обеспечила снижение MnO в шлаке до 5% и содержание FeO в шлаке до 1%. В результате механические свойства стали экспериментальных плавок выросли. Наиболее существенно выросла ударная вязкость на 11,6% с 2595,8 до 2896,5 кДж/м^2. Внедрение разработанной технологии в производство позволило повысить эксплуатационную надежность отливок и расширить номенклатуру отливок, выплавляемых методом переплава.

6.3.1. В ОАО «Копейский машиностроительный завод»

Исследования разработанного способа выплавки стали в дуговой электропечи с кислой футеровкой, включающего дополнительное введение восстановительного периода плавки, где используют две раскислительные порошковые смеси, в процессе диффузионного раскисления РД19П и РД21П позволили выявить целый ряд технологических преимуществ перед традиционной технологией, используемой на заводах при производстве ответственных отливок.

В результате разработанная технология внедрена в ОАО «Копейский машиностроительный завод», который производит проходческие комбайны для добычи полезных ископаемых. Наиболее результативным оказалось внедрение нового технологического процесса плавки для ответственных отливок 2-й группы «корпус турели» и «опора». Это крупногабаритные отливки, вес которых равняется 1,4 и 2 тонны соответственно. В проходческом комбайне со стреловидным исполнительным органом конструктивная прочность поворотной турели обеспечивает эксплуатационную надежность всего комбайна. Опора выемочного комбайна, расположенного на направляющей конвейера, испытывает большие динамические нагрузки при выемке полезных ископаемых и от нее напрямую зависит эксплуатационная надежность комбайна. Поэтому эти отливки относятся к отливкам ответственного назначения второй группы. Изготавливаются они из конструкционной легированной стали 35ХМЛ. При приемке отливок контролируются механические свойства, а именно: предел прочности при

растяжении и относительное удлинение. Их значения должны быть не менее 589 МПа и 12%.

Следует отметить, что эти отливки имеют трудно формуемые криволинейные внутренние и наружные поверхности, с выступами и впадинами в различных плоскостях. В результате удаление пригара, которому они подвержены, отличается высокой трудоемкостью. Необходимо было уменьшать пригар снаружи и особенно внутри отливки. Один из надежных путей решения проблемы — это снижение температуры заливки расплава, что существенно снизит пригар и трудоемкость его удаления.

Таким образом, внедрение новой технологии было направлено на снижение температуры заливки стали на 20 °С и повышение механических свойств стали и эксплуатационной надежности горнопроходческих комбайнов.

Для подтверждения результативности разработанной новой технологии анализировали стали для отливок «турель» и «опора», выплавленные по существующей в цехе до внедрения технологии и после внедрения с применением раскислительных смесей [200, 201]. Отличие опытных плавок заключалось в том, что после окислительного периода и перед окончательной доводкой расплава по химическому составу вводили дополнительно восстановительный период плавки, где использовали две раскислительные порошковые смеси по 2 кг/тж, причем сначала осуществляли присадку первой смеси РД19ПК, основой которого был дисперсный кальций-стронциевый карбонат (КСК), который способствовал вспениванию шлака, разогревал его и делал реакционно-способным, а для проведения рафинировочного процесса на вспененный шлак подавали вторую раскислительную порошковую смесь РД21П, в состав которой входили УСМ и АСМ в соотношении массовых частей 2:1 соответственно КСК и карбоната натрия (Na_2CO_3). Это способствовало глубокому рафинированию расплава

Химические составы металла и шлаков рядовых и экспериментальных плавок приведены в табл. 6.7. Механические свойства сталей и результаты металлографического анализа представлены в табл. 6.8.

Таблица 6.7

Результаты химического анализа стали и шлаков

Плавки	Химический состав стали, % по массе						Химический состав шлаков, % по массе			
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	CaO	SiO_2	FeO	MnO
Рядовые плавки	0,31	0,22	0,81	0,82	0,22	0,012	10,6	47,9	14,2	20,5
	0,33	0,28	0,83	0,89	0,24	0,01	12,9	50,5	13,7	19,5
	0,39	0,33	0,82	0,9	0,25	0,011	15,3	52,0	11,7	20,10
Средние значения	**0,34**	**0,28**	**0,82**	**0,88**	**0,24**	**0,011**	**12,93**	**50,13**	**13,2**	**20,03**

Плавки	Химический состав стали, % по массе						Химический состав шлаков, % по массе			
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	CaO	SiO_2	FeO	MnO
Опытные плавки	0,32	0,34	0,83	0,89	0,22	0,09	13,4	57,8	2,1	14,3
	0,38	0,35	0,82	0,99	0,24	0,011	11,0	59,7	3,5	15,1
	0,34	0,24	0,89	0,81	0,26	0,012	15,4	52,3	3,0	14,6
Средние значения	**0,35**	**0,31**	**0,84**	**0,89**	**0,24**	**0,037**	**13,26**	**56,6**	**2,87**	**14,66**

Таблица 6.8

Сравнительные характеристики механических свойств и микроструктуры рядовых и исследуемых плавок

Плавки	Механические свойства сталей				Индекс загрязненности сталей, $I \cdot 10^{-3}$
	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	Ψ, %	
Рядовые плавки	591	499	14,0	31,0	3,91
	594	412	12,0	35,0	3,66
	598	406	15,0	33,0	3,26
Средние значения	**594**	**439**	**13,6**	**33**	**3,61**
Опытные плавки	653	494	18,0	33,0	2,49
	661	495	17,0	37,0	1,389
	669	491	19,0	33,0	1,75
Средние значения	**661 (10,1%)**	**493**	**16,6 (18)**	**34,3**	**1,88**

Как следует из данных табл. 6.7, концентрации основных элементов в сталях рядовых и опытных плавок сопоставимы. Вместе с тем данные табл. 6.8 свидетельствуют о том, что контролируемые параметры механических свойств сталей, подвергнутых диффузионному раскислению дисперсными смесями, существенно выше, чем у металла, который диффузионному раскислению не подвергался. $\sigma_в$ увеличилось с 594 до 661 МПа, то есть на 10,1%, а δ — с 13,6 до 16,6%, что на 18% выше. Это объясняется более глубокой степенью раскисленности металла в печи и подтверждается низким содержанием FeO и MnO в предвыпускных шлаках (табл. 6.5). FeO уменьшилось с 13,2 до 2,87%, а MnO — с 20,03 до 14,66%. Индекс загрязненности стали неметаллическими включениями уменьшился с 3,61 до $1,88 \cdot (10^{-3})$, что способствовало увеличению ее жидкотекучести и позволило снизить температуру заливки расплава на 20 °С с 1580 до 1560 °С. В результате уменьшился пригар и трудоемкость его удаления на отливках «турель» и «опора». Кроме того, установлено, что внедрение новой технологии приводит к уменьшению времени плавки, экономии электроэнергии, предохраняет свод и откосы от прямого излучения дуги,

повышает их срок службы, позволяет экономить ферросилиций и ферромарганец, а также повысить производительность за счет более полной разливки стали из ковшей.

Таким образом, внедрение новой технологии позволило снизить температуру заливки на 20 °С, существенно уменьшить трудоемкость удаления пригара и значительно повысить механические свойства стали отливок турель и опора. $\sigma_в$ увеличилось с 594 до 661 МПа, то есть на 10,1%, а δ — с 13,6 до 16,6%, что на 18% выше. В результате выросла и эксплуатационная надежность горнопроходческих комбайнов.

Изменения в технологическом процессе плавки были внесены в нормативно-техническую документацию завода [200] и отражены в акте внедрения.

6.3.2. На Анжерском машиностроительном заводе (ОАО «Анжеромаш»)

В ОАО «Анжеромаш» новая технология обеспечила:

– повышение содержания С в стали на 0,02–0,04%, за счет чего снижается расход чугуна ПЛ1 для науглероживания при корректировке стали на 50% от норм расхода;

– вспенивание шлака**,** экранизация электрических дуг и ускорение нагрева металла, за счет чего экономится электроэнергия;

– резкое повышение жидкотекучести стали при заливке форм по сравнению с рядовыми плавками, что позволяет получать качественные отливки при заливке форм на нижнем допустимом температурном пределе;

– после окончания разливки металла значительно уменьшились настыли на чайнике ковша, что повышает стойкость футеровки и облегчает межплавочный ремонт;

– на 80% осмотренных отливках отсутствовали газовые раковины в местах среза прибылей, что приводит к снижению затрат на исправление газовых дефектов;

– за счет ускоренного нагрева металла развивается кремний восстановительный процесс, повышается усвоение кремния и марганца, что позволяет расширить допуски концентраций основных элементов в химическом составе стали 25ГСЛ.

На основании проведенных исследований принято решение:

– Внедрить в технологический процесс плавки в печах с кислой футеровкой диффузионное раскисление стали раскислителями РД19П и РД21П, а также внепечную обработку расплава рафинирующей смесью РСУ производства ООО «Металлург» СОАЛ.

– Произвести корректировку норм расхода материалов: ввести дополнительно в нормы расхода раскислительные смеси диффузионные РД19П и РД21П в количестве по 1,5 кг на 1 т/ж и рафинирующую смесь универсальную РСУ в количестве 2,5 кг на 1 т/ж; уменьшить расход передельных чугунов ПЛ1, ПЛ2 на 50% то есть на 5,95 кг на 1 т/ж.

Таблица 6.9

Расчет экономической эффективности по расходу материалов при внедрении материалов РД19П, РД21П, РСУ. Сталь марки 25ГСЛ, кислый процесс

№п/п	Марка материала	* Цена за 1 тонну, руб.	Цена с НДС за 1 тонну, руб.	Расход на 1 т/ж, кг	Удорожание на 1 т/ж, руб.	Примечания
1	РД-19	42320,00	50784,00	1,500	76,18	Рафинирование шлака (в печи)
2	РД-21	42320,00	50784,00	1,500	76,18	
3	РСУ	638000,00	76560,00	2,500	191,40	Рафинирование стали в ковше
4	Чугун ПЛ 1; ПЛ 2		57600,00	– 5,95	– 342,72	Корректировка химсостава стали по углероду
ИТОГО					–151,32 руб. т/ж	

Таким образом, внедрение материалов РД19ПК, РД21ПК и РСУ позволило получить экономический эффект за счет экономии материальных затрат в размере 151,32 руб. т/ж [289].

6.4. Освоение разработанных технологий и материалов при производстве отливок «клин фрикционный» из чугунов, СЧ35 и ВЧ 120

6.4.1. Освоение производства отливок «клин фрикционный» марки СЧ35 и разработка технологии изготовления отливок из ВЧ

Все более востребованными в РЖД становятся отливки «клин фрикционный» марки СЧ35. Поэтому в АО «БАЗ» клин должен отливаться из серого чугуна марки СЧ35; $\sigma_B \geq 350$ МПа; НВ=230–275. Химический состав чугуна фрикционных клиньев указан в табл. 6.10.

Таблица 6.10

Элементный состав чугуна СЧ35 для отливок «клин фрикционный»

Наименование изделия	Элементный состав чугуна, % по массе							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
				Не более				
Клин фрикционный	2,85–3,05	1,2–1,5	0,7–1,0	0,2	0,12	0,4	0,4	0,4

Микроструктура СЧ35 должна быть следующей: металлическая основа: П, П92; Пд0,3–Пд1,0; цементит: 0–Ц2; Цп2000; графит: ПГф1–ПГф2; ПГд25–ПГд90; ПГр1–ПГр3; ПГ6–ПГ10.

Химический состав чугуна определяется на каждой плавке. Свойства чугуна при растяжении определяются на образцах, вырезанных и изготовленных из вертикальной стенки фрикционных клиньев по ГОСТ 24648-90. Здесь же контролируется и микроструктура. Твердость по

Бринеллю (ГОСТ 9012-59) контролируется на вертикальной рабочей поверхности клина. При неудовлетворительных результатах контроля хотя бы по одному показателю все клинья данной плавки бракуются.

На предприятиях РФ отливки «клин фрикционный» обычно изготавливают литьем в песчано-глинистые формы. Отливки традиционно находятся в нижней полуформе. Это обеспечивает направленную кристаллизацию отливок, простейшую литниковую систему, что в сочетании с высокой податливостью форм ПГС обеспечивает высокий выход годного литья (рис. 6.1) [18].

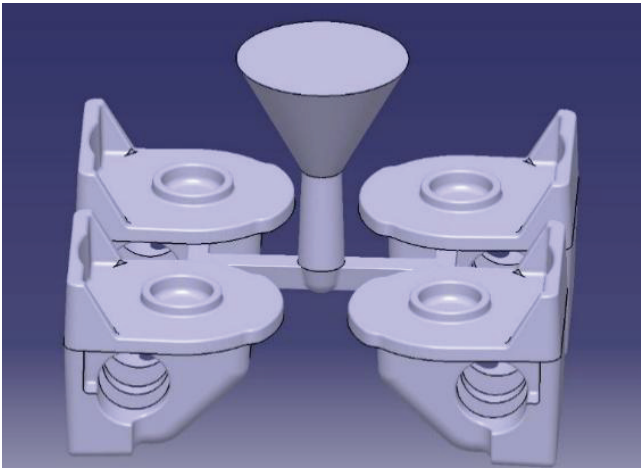


Рисунок 6.1. Куст отливок традиционного производства

АО «БАЗ» выбрал нетрадиционный способ изготовления отливок корпусов литьем в оболочковые формы (рис. 6.2, 6.3).

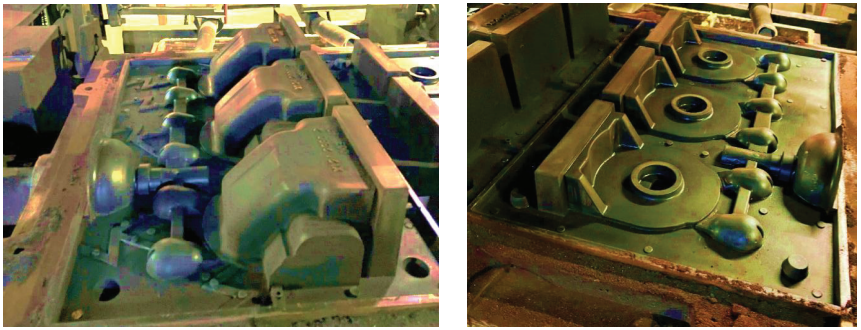


Рисунок 6.2. Оснастка для изготовления оболочек полуформ

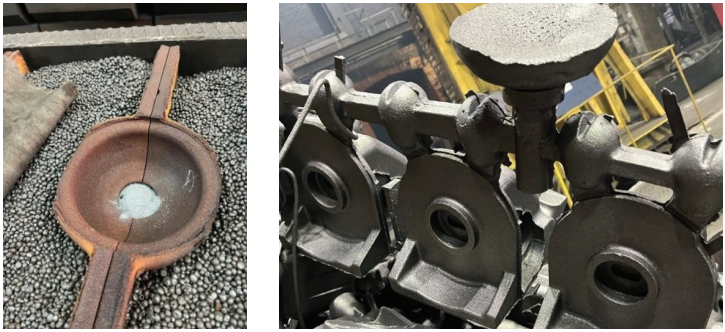


Рисунок 6.3. Оболочковая форма, засыпанная дробью, и куст отливок

Литье в оболочковую форму имеет целый ряд преимуществ, а именно: высокая чистота поверхности и точность размеров; хорошая газопроницаемость формы, обеспечивающая отсутствие газовых пор; отсутствие пригара смеси, так как при выгорании фенолформальдегидной смолы создается тонкая газовая рубашка, которая защищает поверхность отливки; форма легко разрушается, и отливки легко удаляются из формы; расход формовочной смеси в 5–10 раз меньше, чем при литье в песчаные формы. При этом полуформы достаточно тверды, чтобы сохранять сложную форму отливки, не деформируясь.

Тонкие оболочки и засыпанная между ними дробь обеспечивают высокую скорость охлаждения отливок в форме. Это обеспечивает благоприятные условия для кристаллизации мелкодисперсных графита и перлита в структуре отливок и существенно облегчает получение требуемых механических свойств. Вместе с тем, высокая скорость кристаллизации обуславливает опасность появления избыточного цементита в структуре чугуна и повышению твердости и снижению против допустимых ТУ.

Плавка чугуна на заводе ведется в индукционной печи ИСТ 0,5. Расчет шихты производили по средним показателям требований ТУ. Температура чугуна перед выпуском равнялась 1420–1430 °С. Разливка чугуна производилась поворотным ковшом емкостью 700 кг. При заполнении ковша производили присадку графитизирующего модификатора Z-GRAPH фракцией 1–10 мм в количестве 0,5% от металлоемкости ковша под струю расплава. Анализ результатов показал, что в отдельных плавках количество избыточного цементита в отливках колебалось от Ц4 до Ц10. При этом в отливках с высоким содержание цементита наблюдалось отклонение механических свойств от требований ТУ. Предел прочности был ниже 350 МПа и составлял от 228 до 328 МПа, а твердость была завышена и колебалась от 280 до 355 НВ. **Для устранения брака по наличию избыточного цементита (больше 2%) в структуре чугуна провели эксперименты по повышению эффективности графитизирующего модифицирования чугуна.** Для этого к модификатору **Z-GRAPH (0,5%)**,

применяемому на заводе для ковшевой обработки, добавили модификатор **МК82 (0,3%)**. Комплексное воздействие на расплав чугуна МК82 и **Z-GRAPH** значительно усилило графитизацию чугуна.

Провели пять экспериментальных плавок, в которых в ковш присаживали 1,5 кг (0,3%) МК82 и 2,5 кг (0,5%) **Z-GRAPH**. Результаты экспериментальных плавок приведены в табл. 6.11–6.14.

Таблица 6.11

Химический состав отливок в экспериментальных плавках

№ плавки	C 2,85–3,05%	Si 1,2–1,5%	Mn 0,7–1,0%	P до 0,2%	S до 0,12%	Cr до 0,4%	Ni до 0,4%	Cu до 0,4%	Соотношение C/Si
1	2,978	1,430	0,836	0,058	0,045	0,372	0,173	0,156	2,08
2	2,994	1,408	0,892	0,071	0,05	0,376	0,35	0,153	2,13
3	3,024	1,361	0,886	0,098	0,050	0,166	0,148	0,145	2,22
4	2,937	1,477	0,926	0,058	0,039	0,300	0,163	0,154	1,99
5	3,009	1,370	0,851	0,040	0,032	0,291	0,134	0,182	2,20

Таблица 6.12

Механические свойства отливок в плавках

№ плавки	Твердость 235–275 НВ	Масса отливки 16,2 кг	Предел прочности при растяжении 350–400 МПа
1	241	16,3	350
2	235	16,1	400
3	235	16,2	380
4	235	16,2	370
5	255	16,3	350

Таблица 6.13

Микроструктура отливок

№ Пл.	Металлическая основа (перлит П–П92)	Дисперсность перлита (ПД0,3–ПД1,0)	Содержание цементита (0-Ц2)	Площадь наибольших включений цементита	Форма графита (ПГф1–ПГф2)	Длина включений графита (Пгд25–Пгд90)	Распределение включений графита (ПГр1–ПГр3)	Количество включеграфита (ПГ6–ПГ10)
1	П96	ПД0,5	Ц2	Цп2000	ПГф1	ПГд45	ПГр3	ПГ6
2	П96	ПД1,0	Ц2	Цп2000	ПГф1	ПГд90	ПГр2	ПГ6
3	П96	ПД1,0	0	Цп2000	ПГф1	ПГд90	ПГр2	ПГ6
4	П96	ПД0,5	Ц2	Цп2000	ПГф1	ПГд45	ПГр1	ПГ6
5	П	ПД0,3	0	Цп2000	ПГф1	ПГд45	ПГр2	ПГ6

Как видно из данных табл. 6.11–6.14, химический состав, микроструктура и механические свойства отливок удовлетворяют требованиям ТУ 3183-234-01124323. То есть комплексное модифицирование расплава способствовало устранению брака по наличию избыточного цементита в отливках и обеспечило требуемую по ТУ микроструктуру и механические свойства.

По разработанной технологии комплексного модифицирования провели 75 плавок чугуна СЧ35, что достаточно для объективной оценки технологического процесса. При анализе качественных показателей чугуна использовали метод статистической обработки и регрессионного анализа полученных данных с уровнем значимости в расчетах равным 0,05.

На первом этапе изучили качественные показатели чугуна обязательные как сдаточные характеристики, а именно: химический состав, механические свойства и микроструктуру отливок. Кроме того, фиксировались температуры выпуска чугуна и заливки форм. Результаты вычислений представлены в табл. 6.15.

Таблица 6.15

Результаты статистических вычислений

Переменные	Результаты статистики						
	Кол. плавок	Среднее значение	Минимум	Максимум	Дисперсия	Ср. кв. отклонение	Коэф. вариации, V, %
Температура выпуска	75	1424,000	1420,000	1430,000	6,6000	2,56905	0,18041
Температура в ковше	75	1379,081	1374,000	1389,000	5,4655	2,33783	0,16952
C (2,85–3,05)	75	2,983	2,900	3,049	0,0013	0,03609	1,20964
Si (1,2–1,5)	75	1,397	1,320	1,485	0,0013	0,03669	2,62607
Mn (0,7–1,0)	75	0,858	0,779	0,971	0,0019	0,04341	5,05856
P до 0,2	75	0,055	0,037	0,101	0,0002	0,01255	22,63446
S до 0,12	75	0,041	0,027	0,055	0,0000	0,00641	15,59306
Cr до 0,4	75	0,267	0,121	0,399	0,0048	0,06897	25,81104
Ni до 0,4	75	0,150	0,074	0,334	0,0010	0,03162	21,13467
Cu до 0,4	75	0,155	0,113	0,188	0,0002	0,01402	9,04079
C/Si	75	2,137	1,988	2,259	0,0040	0,06291	2,94421
HB (235–275)	75	245,373	235,000	269,000	105,2371	10,25851	4,18078
$\sigma_в$ (350–400) МПа	75	359,547	350,000	390,000	145,9268	12,08002	3,35979

Изучили показатели, которые во многом зависят от мастерства плавильщиков. Это температуры выпуска металла, начала заливки чугуна, а также концентрации основных элементов, определяющих качество чугуна, которые обеспечивают плавильщики во время выплавки расчетным путем добавками ферросплавов. Как видно из данных табл. 6.12, наиболее стабильна температура начала заливки чугуна (V=0,169%), что свидетельствует о стабильности процесса заливки и дает возможность успешно бороться с браком

по пригару, неспаям и недоливам. Концентрации основных элементов, определяющих качество чугуна, которые обеспечивают плавильщики во время выплавки добавками ферросплавов расчетным путем, достаточно хорошо согласуются с требованиями ТУ. Содержание C, Mn и Si удовлетворяет требованиям ТУ и находится в допустимых пределах (C=(2,85–3,05%); Mn=(0,7–1,0%); Si=(1,2–1,5%)). Они отличаются высокой стабильностью (V у C, Mn, Si, равны соответственно 1,20964; 5,05856 и 2,62607%, табл. 6.12). Концентрации элементов стремятся к нормальному распределению, что наглядно представлено на примере гистограммы концентраций Mn. Это свидетельствует об удовлетворительных мастерстве плавильщиков и технологической дисциплине на участке плавки. Как видно из данных табл. 6.12, средние концентрации Cu, Ni и Cr, равные 0,15; 0,155 и 0,267%, удовлетворяют требованиям ТУ, максимальные и минимальные значения содержаний этих элементов также находятся в допустимом диапазоне концентраций.

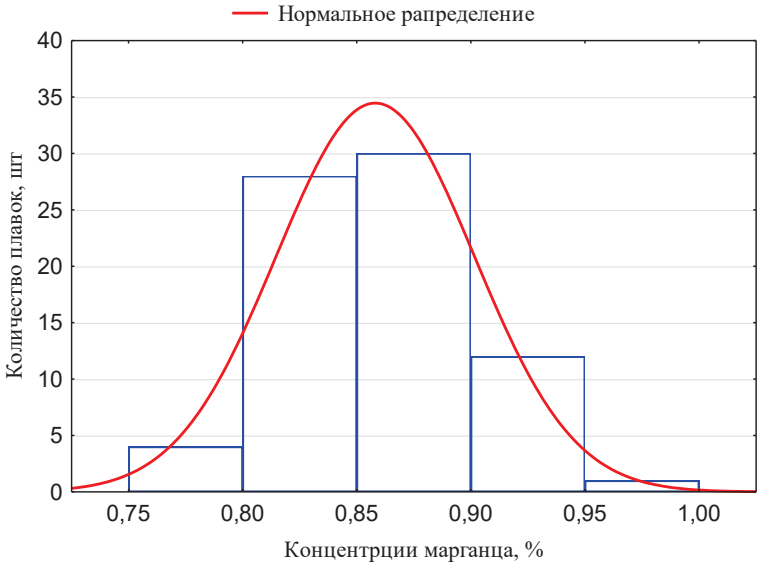


Рисунок 6.4. Гистограмма концентраций марганца

Большое влияние на качество чугуна оказывают шихтовые материалы, которые содержат примеси, концентрации которых не могут изменить плавильщики в процессе выплавки чугуна. P и S оказывают существенное отрицательное влияние на механические свойства чугуна для ответственных отливок. Среднее содержание P в чугунах, равное 0,055% с V=22,63% (табл. 6.12), удовлетворяет требованиям ТУ (P≤0,2%). Концентрации серы также находятся в допустимых пределах до 0,12%.

В результате анализ механических свойств чугуна (табл. 6.15) показывает, что прочностные характеристики механических свойств **$\sigma_в$** достаточно стабильны (V=7,7%) и хорошо согласуются с требованиями ТУ. $\sigma_в$ в среднем равна 359,5 МПа. Стабильна и твердость чугуна.

Таким образом, можно констатировать, что АО «БАЗ» освоил производство ответственных железнодорожных отливок «клин фрикционный» из чугуна марки СЧ35. На заводе достигли оптимальных технологических решений в плавке, заливке чугуна и формовке отливок, обеспечивающих выполнение требований технических условий к качеству отливок из чугуна СЧ35 и минимальный брак. Намечены пути дальнейшего повышения качества литья [288].

6.4.2. Разработка технологии производства отливок из высокопрочного чугуна с выплавкой в индукционной печи

Следует отметить, что в настоящее время не менее востребованы отливки клин фрикционный из ВЧ120. В связи с этим на заводе разработали технологический процесс производства отливок из ВЧ, вписывающийся в действующее производство отливок «клин фрикционный» из СЧ35. Был выбран наиболее приемлемый для быстрого освоения производства сэндвич-метод, не требующий капитальных затрат. Для модифицирования использовали имеющийся поворотный ковш. Модификаторы загружали на дно ковша в место, противоположное падению струи при выпуске металла, в следующей последовательности: вначале отдавали сфероидизирующий модификатор, затем сверху на него присаживали графитизирующие модификаторы, а в заключение их пригружали стальной дробью.

От выбора сфероидизирующих и графитизирующих модификаторов во многом зависит успешное освоение производства (ВЧ). В качестве сфероидизирующего модификатора использовался ErgoMag-59 («ЭргоМаг») фракции 1–10 мм, производимый фирмой SNAM ALLOYS PVT.LTD (Индия) со следующим химическим составом, %масс: 43–48 Si; 0,8–1,2 Ca; 0,4–1,0 Al; 0,8–1,2 РЗМ; 5,5–6,2 Mg, Fe по балансу. Достоинством модификатора следует считать оптимальное количество магния 5,5–6,2% и наличие в нем 0,8–1, 2% РЗМ, который обладает более высоким сродством к кислороду и сере, чем магний, связывает их и тем самым обеспечивает магнию возможность работать только на сфероидизацию графита, стабилизируя процесс. При ковшевом модифицировании ВЧ производитель рекомендует присаживать от 1,1 до 1,5% модификатора от металлоемкости ковша.

Для графитизирующией обработки расплава выбран модификатор ErgoSil67. Содержание элементов в нем следующее, %масс: 64–70 Si; 1,0–2,0 Ca; 2,0–3,0 Ba; 0,8–1,5 Al; Fe — по балансу, что позволяет устранять отбел как в сером, так и в высокопрочном чугунах, стабилизируя процесс графитизации. При ковшевом модифицировании ВЧ производитель рекомендует присаживать от 0,2 до 0,5% при графитизирующей обработке ВЧ.

Также применили рекомендованный ООО «Металлург» СОАЛ комплексный графитизирующий модификатор МК82 (ТУ 0826-003-47647304-2001). Его дополнительно присаживали в ковш вместе с ErgoSil67 для усиления графитизирующего модифицирования и снижения пироэффекта. В составе МК82 находится 79–81% дисперсного активного углерода, что значительно усилит графитизирующие возможности ErgoSil67. Кроме того, в составе МК82 находится 19–21% кальций-стронциевого карбоната (КСК). При ковшевом модифицировании при температуре 950 °С карбонаты Ca и Sr, находящиеся в составе МК82 форсированно диссоциируют и при этом выделяют газ CO_2. Последний окисляет твердый углерод, который присутствует в МК82, образующийся CO вытесняет из зоны реакции в ковше кислород воздуха. Пары магния, сублимирующего при 1105 °С, оказываются в восстановительной атмосфере CO и не окисляются. В результате пока работает МК82 пироэффект и дымовыделение отсутствуют. Они задерживаются по времени, а усвоение магния увеличивается.

Учитывая конструкцию ковша, не предназначенную для сэндвич-метода, расход сфероидизирующего модификатора приняли по верхнему пределу от 1,5% к массе расплава. При выборе химического состава ВЧ руководствовались рекомендациями ГОСТ 7293-85. Чугун с шаровидным графитом. При производстве чугуна марки ВЧ40 концентрации C (3,2–3,8%) и Si (1,9–2,9%) выбирали ближе к верхнему пределу. Для ВЧ 40 содержание марганца необходимо выдерживать меньше 0,2%. Шихта должна содержать минимальное количество Ni, Cu и Cr. Содержание фосфора в исходном чугуне не должно превышать 0,1%, а содержание серы — 0,05%.

Сэндвич-метод, положенный в основу настоящего технологического процесса, предусматривает внепечную обработку исходного чугуна сфероидизирующим и графитизирующими модификаторами в ковше с целью получения ВЧ. Поэтому при расчете шихты учитывали количество кремния, вносимое сфероидизирующим и графитизирующим модификаторами. При расчете требуемого содержания углерода в исходном чугуне учитывали снижение содержания углерода в процессе модифицирования за счет введения модификаторов и пригрузочного материала.

Исходными данными для расчета шихты служили: требуемый химический состав исходного чугуна перед модифицированием чугуна; химический состав компонентов шихты; усвоение элементов из карбюризаторов; угар элементов при расплавлении шихты. Расчет шихты производили для получения марок чугуна ВЧ40 и ВЧ70. Нужно было получить концентрации углерода и кремния, соответствующие каждой марке ВЧ. Содержание серы должно быть минимальным.

Плавки ВЧ велись в действующей на заводе индукционной печи ИСТ. Модифицирование проводили в чайниковом ковше вместимостью 700 кг. В качестве шихтовых материалов использовали передельный чугун ПЛ-1, стальной лом 3А. Для доводки исходного химического состава перед

модифицированием чугуна по кремнию использовали ФС45, а по углероду — науглероживатель ГИИ 1.

На первой плавке планировали получить марку чугуна ВЧ40. Расчет шихты вели для получения 500 кг жидкого исходного перед модифицированием чугуна. По расплавлению получили следующий химический состав чугуна, %масс; C=3,289; Si =0,455; Mn=0,333; S=0,018: P=0,047; Cr=0,036. Как видно, химический состав чугуна отличался низким содержанием серы, что благоприятно сказывается при получении ВЧ. Низкие концентрации Mn и Cr стабилизирующих перлит также благоприятствуют получению пластичного чугуна марок ВЧ40 и ВЧ45. Для успешного получения таких марок увеличили концентрацию Si в расплаве до 1,04% за счет присадки в печь ФС45. Для модифицирования в ковше использовали сфероидизирующий модификатор ErgoMag-59 фракция 1–10 мм=1,9%; графитизирующий модификатор ErgoSil67, фракция 0,7–3 мм — 0,4%; дробь стальную — 1,4%. Модификатор МК82 в данной плавке не использовали для получения в последующем сравнительных результатов от его воздействия на процесс модифицирования. Разогрели металл до температуры 1440° С и произвели выпуск чугуна.

Выпуск металла в ковш длился 5 минут. Во время всего выпуска наблюдались сильный пироэффект и дымовыделения. После окончания заполнения ковша расплавом его выдержали в течение 3 минут на заливочной площадке до окончания бурления, что свидетельствовало об окончании реакции взаимодействия магния с расплавом. Из ковша модифицированным чугуном залили пробу на химический анализ, клиновую пробу на склонность чугуна к отбелу и стержневые пробы для изготовления из них образцов для испытаний на механические свойства по ГОСТ 977-88. Затем залили две формы с отливками «клин фрикционный».

Химический состав чугуна после модифицирования был следующий, %масс: C=3,306; Si=2,04; Mn=0,382; S=0,012%; P=0,059%; Cr=0,044. Он удовлетворял требованиям к феррито-перлитному чугуну марки ВЧ40.

Излом клиновой пробы на склонность чугуна к отбелу, косвенно указывающий на качество сфероидизирующего модифицирования, показал, что величина отбела на клиновой пробе составил 8 мм. Остальная часть клина имела мелкозернистую макроструктуру светлого сталистого цвета, что свидетельствовало об удовлетворительном качестве сфероидизирующего и графитизирующего модифицирования. Удовлетворительный результат сфероидизирующего модифицирования ВЧ подтвердил визуальный осмотр полученных отливок.

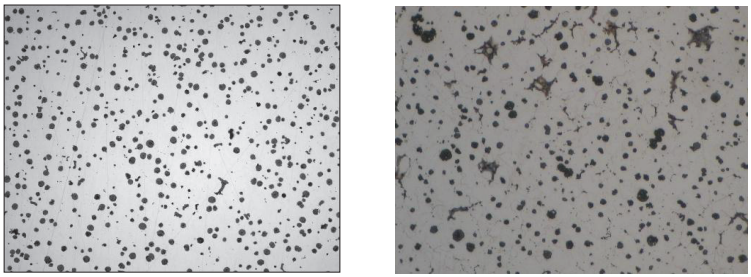


Рисунок 6.5. Отливка «клин фрикционный» из ВЧ

Как видно на рис. 6.5, изломы питателей на отливках «клин фрикционный» имеют мелкозернистую макроструктуру светлого сталистого цвета, что свидетельствует о наличии шаровидного графита в отливках. При простукивании отливок молоточком они издавали мелодичный звон, что также косвенно свидетельствует о наличии шаровидного графита в отливках из ВЧ. При простукивании отливок из серого чугуна с пластинчатым графитом они отдают глухой звук. Газоусадочные раковины в отливках отсутствуют. Вместе с тем в отливках «клин фрикционный» из ВЧ присутствовали утяжины напротив питателя. Это вызвано повышенной склонностью ВЧ к усадке, что необходимо учитывать при проектировании оснастки для производства отливок из ВЧ.

Образец для определения механических свойств, микроструктуры вырезали из отливок. Химический состав чугуна (C=3,306; Si=2,04; Mn =0,382; S=0,015%; P=0,059%; Cr=0,044) отличался низким содержанием серы, марганца, хрома, что благоприятно для кристаллизации пластичного чугуна марки ВЧ40. Механические свойства ВЧ показали следующий результат. $\sigma_в$=460 МПа; δ=15%, что соответствует марке чугуна ВЧ 40. Микроструктура изображена на рис. 6.6. Она соответствовала марке чугуна ВЧ40.

На следующей плавке была поставлена задача получить высокую марку чугуна ВЧ70 или ВЧ80. Прежде всего учли недостатки, выявленные при проведении предыдущей плавки. Уменьшили количество сфероидизатора ErgoMag-59 до 1,5%. Для усиления графитизирующего эффекта, снижения пирроэфекта и дымовыделения при модифицировании в ковш дополнительно к графитизирующему модификатору ErgoSil67 присаживали комплексный модификатор МК82.



а ×100 б ×100

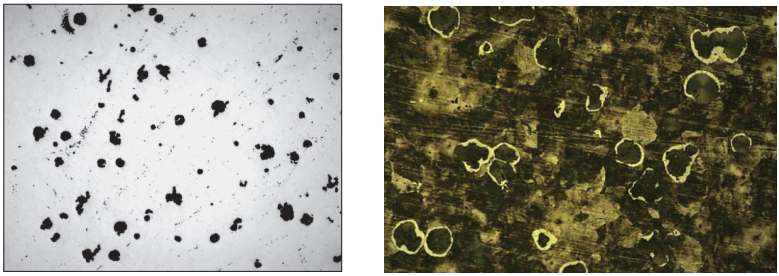
Рис. 6.6. Микроструктура шлифов: а — не травлено: ШГф4, 5; ШГд45; ШГр1; ШГ10; Ц0; б — травлено: Фе94 (П6), Ц0

По расплавлению получили следующий химический состав чугуна, %масс; C=3,431; Si=0,486; Mn =0,401; S=0,023; P=0,050; Cr=0,0306. Как видно химический состав чугуна, как и в предыдущей плавке, отличался низким содержанием серы, что благоприятно для получения ВЧ. Низкие концентрации Mn и Cr способствуют получению пластичного чугуна марок ВЧ40, ВЧ45. Легирование чугуна Ni, Cu не производили. Поэтому для получения ВЧ70 при таком химическом составе необходимо было обеспечить низкую концентрацию Si в расплаве после модифицирования равную 1,5–1,6%, что обеспечили присадками ФС45 в печь и внесли модификаторами при ковшевой обработке чугуна.

Для модифицирования в ковше использовали: сфероидизирующий модификатор ErgoMag-59 фракция 1–10 мм — 1,5%; графитизирующий модификатор ErgoSil67, фракция 0,7–3 мм — 0,5%; комплексный модификатор МК82 в количестве 0,3%; дробь стальную — 1,4%. Разогрели металл до температуры 1440 °С и произвели выпуск чугуна. Следует отметить, что при выпуске металла в ковш первые 4 минуты пироэффект и дымовыделения отсутствовали. Лишь после заполнения ¾ ковша появился слабый пироэффект. Это объясняется тем, что МК82 за это время полностью усвоился. Образование CO прекратилось, а остатки ErgoMag-59 еще продолжали реагировать с чугуном. После окончания заполнения ковша расплавом его выдержали на заливочной площадке до окончания бурления расплава. Затем залили пробу на химический анализ чугуна, технологические пробы на склонность чугуна к отбелу, на механические свойства чугуна и 2-й формы отливок «клин фрикционный». Химический состав чугуна после модифицирования был следующий: C=3,404; Si=1,55; Mn=0,419; S=0,013; P=0,053; Cr=0,046. Излом клиновой пробы на склонность чугуна к отбелу, косвенно указывающий на качество сфероидизирующего модифицирования, показал, что величина отбела на клиновой пробе составил 10 мм. Остальная часть клина имела мелкозернистую макроструктуру светлого сталистого цвета, что свидетельствовало об удовлетворительном качестве сфероидизирующего и графитизирующего модифицирования. Удовлетворительный результат

сфероидизирующего модифицирования ВЧ подтвердил визуальный осмотр полученных отливок. Изломы питателей на отливках «клин фрикционный» имели мелкозернистую макроструктуру ВЧ.

Механические свойства ВЧ на образцах для механических испытаний, вырезанных из отливки, показали следующий результат. σ_B=803 МПа; δ=4%, что соответствует марке чугуна ВЧ 80. Этому способствовало низкое содержание кремния в ВЧ равное 1,55%. Металлическая матрица имела структуру дисперсного перлита (рис. 6.7).



а б

Рисунок 6.7 — Микроструктура ВЧ:
а — не травлено: ШГф4, 5; ШГд45; ШГр1; ШГ10;
б — травлено: П92 (Фе8), Ц0

Анализируя вышесказанное, в АО «БАЗ» доказана принципиальная возможность организации производства отливок из ВЧ марок от ВЧ40 до ВЧ80. Требуемую марку необходимо получать, варьируя концентрациями углерода и кремния. Для получения низких марок необходимо концентрации С и Si выдерживать ближе к верхнему пределу, а для производства высоких марок ближе к нижнему пределу. Кроме того, полученные результаты позволяют сделать вывод, что в АО «БАЗ» имеется возможность организовать производство клиньев фрикционных из ВЧ120. Как видно из результатов исследований, все условия для отливок «клин фрикционный» из ВЧ в литом состоянии выполнимы [267].

Для получения ВЧ120 из сырых клиньев необходимо произвести изотермическую закалку отливок. Сырые отливки из чугуна марок ВЧ70, ВЧ80 и клиновую пробу необходимо нагреть в термической печи до температуры 950 °С и выдержать в ней 2,5 часа для полной аустенизации структуры чугуна и затем перенести отливки в соляную ванну из смеси калиевой и натриевой селитр, взятых в соотношении 1:1. Температура солевого расплава должна быть чуть выше линии начала мартенситного превращения 300–350 °С. Выдержка в соляной ванне производится в течение 2 часов. После чего отливки охлаждаются на воздухе. При этом получается структура нижнего бейнита.

Таким образом, в условиях АО «БАЗ» в действующее производство отливок «клин фрикционный» из чугуна СЧ35 легко вписывается производство отливок из ВЧ40–ВЧ80 и ВЧ120 [287].

6.4.3. Освоение производства отливок «клин фрикционый» из ВЧ 120 с выплавкой чугуна в электродуговой печи

Плавку чугуна вели в электродуговой печи ДСП3. В качестве шихтовых материалов применяли возврат ВЧ120, стальной лом, передельный чугун. Отличительной особенностью плавки явилось диффузионное раскисление шлака и металла присадками РДА в количестве 4 кг/т жидкого для глубокой десульфурации чугуна. Кроме того, чугун легировали медью и молибденом.

Для сфероидизирующего модифицирования использовали сэндвич-метод в обычном чайниковом ковше емкостью 5 т. В качестве сфероидизатора использовали ErgoMag-5911. В качестве графитизаторов применили ErgoSil67 и дополнительно МК82. Для пригрузки модификаторов использовали стальную дробь. Для разливки чугуна применяли разливочный ковш емкостью 500 кг. Для изготовления образцов заливали клинообразные пробы по ГОСТ 977 черт. 3.

Для получения ВЧ120 сырые клинья фрикционные подвергались изотермической закалке в термической печи при температуре 950 °С, затем в закалочной ванне в расплаве солей при температуре 300 °С, после чего отливки охлаждались на воздухе. Таким образом, получали структуру нижнего бейнита.

Для анализа качественных показателей чугуна использовали статистическую обработку полученных данных в пакете STATISTICS&ANALISIS v.12.0. Stat Soft, Inc. с принятым уровнем значимости в расчетах, равным 0,05.

Произвели статистический анализ химического состава и механических свойств 30 плавок чугуна ВЧ120. Результаты представлены в табл. 6.16.

Таблица 6.16

Результаты статистического анализа

Переменные	Результаты статистики						
	Кол. набл.	Среднее	Минимум	Максим.	Дисперсия	Ср.кв. откл.	Коэф. вар., V, %.
C	30	3,475	3,120	3,780	0,037	0,19252	5,54090
Si	30	2,656	2,520	2,790	0,009	0,09224	3,47263
Mn	30	0,498	0,430	0,590	0,002	0,04133	8,29626
S	30	0,010	0,007	0,013	0,000	0,00128	12,95419
P	30	0,022	0,016	0,038	0,000	0,00465	20,98046
Mg	30	0,056	0,030	0,077	0,000	0,01413	25,15667
Mo	30	0,209	0,160	0,280	0,001	0,02689	12,87819
Cu	30	0,19	0,1	0,27	0,040	0,0016	21,57253

Переменные	Результаты статистики						
	Кол. набл.	Среднее	Минимум	Максим.	Дисперсия	Ср.кв. откл.	Коэф. вар., V, %.
Cr	30	0,071	0,060	0,080	0,000	0,00641	9,00721
$\sigma_в$, МПа литое сост.	30	798,615	630,0	884	5784,806	76,057	9,5
δ, % литое сост.	30	4,530	1,8	8,8	3,4	1,860	41,068
$\sigma_в$, МПа после термообр.	30	1312,852	1023,000	1459,000	9753,823	98,76145	7,52266
$\sigma_в$, МПа после термообр.	30	3,433	1,200	6,000	2,484	1,57602	45,90356

Изучили показатели, которые во многом зависят от мастерства сталеваров. Концентрации основных элементов, определяющих качество чугуна, которые обеспечивают сталевары во время выплавки добавками ферросплавов расчетным путем, достаточно хорошо согласуются с требованиями ТУ 3183-163-01124323. Содержание С в среднем равняется 3,475%, что удовлетворяет требованиям ТУ. Они отличаются высокой стабильностью (V=5,54%). Концентрации Mn также находятся в допустимых пределах, предусмотренных ТУ, и достаточно однородны (V=8,29626).

Концентрации кремния в чугуне также стабильны (V=3,47%). Из табл. 6.16 видно, что содержания кремния находятся в допустимых пределах, рекомендуемых ТУ 3183-163-01124323. Здесь нужно отдать должное сталеварам, которые точно рассчитывают содержания кремния в чугуне. Так как в процессе модифицирования кремний, входящий в состав модификаторов, растворяется в исходном чугуне, увеличивая его содержание.

Вредное влияние S на процесс сфероидизирующего модифицирования и механические свойства чугуна общеизвестно. В результате проводимого диффузионного раскисления среднее содержание S в анализируемых плавках стали равное 0,01% существенно ниже требуемого ТУ (0,02%).

Вышесказанное свидетельствует об удовлетворительном проведении сталеварами диффузионного раскисления и высокой эффективности РДА.

В результате успешно проведенной десульфурации и использования МК82 средняя концентрация магния в чугуне равная 0,056% также удовлетворяет требованиям ТУ.

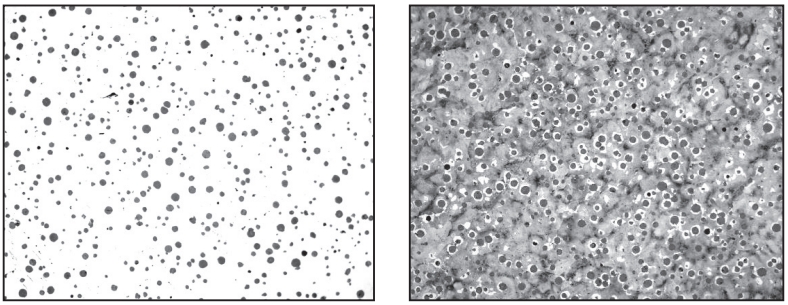
Стабильны и содержания легирующих элементов в чугуне молибдена и меди. Это очень важно для стабилизации перлита в микроструктуре сырого ВЧ,

Большое влияние на качество чугуна оказывают шихтовые материалы, которые содержат примеси, концентрации которых не могут изменить сталевары в процессе выплавки. К ним относятся Cr, и Р. Среднее содержание Cr равное 0,071% удовлетворяет требованиям ТУ 3183-163-01124323

(Cr≤0,15%). Вредное влияние Р общеизвестно. Он оказывает большое отрицательное влияние на механические свойства чугуна. Среднее содержание Р, достигнутое в чугунах равное 0,022% (табл. 6.16) удовлетворяет требованиям ТУ 3183-163-01124323 (Р≤0,07%). Таким образом, качество применяемых на заводе шихтовых материалов удовлетворительное.

Все вышесказанное свидетельствует об удовлетворительной технологической дисциплине на участке плавки и заливки и об удовлетворительном качестве шихтовых материалов.

В результате и механические свойства высокопрочного чугуна показали высокие результаты. Следует отметить, что высокие результаты получены уже в литом состоянии. Среднее значение предела прочности в сыром состоянии равнялось 798,615 МПа, а относительное удлинение в среднем достигло 4,53% (табл. 6.16), что отвечает марке ВЧ70. Микроструктура ВЧ в литом состоянии состояла из шаровидного графита и перлитной матрицы после травления (рис. 6.8).



а б

Рисунок 6.8. Микроструктура ВЧ в литом состоянии:
а — не травлено: ШГф5-ШГф4; ШГд 25-ШГд45; ШГрI; ШГ12;
б — травлено, нитал: П92; ПД 0,5; Ц0

Это стало возможным благодаря глубокой десульфурации расплава при диффузионном раскислении с применением РДА, удовлетворительном усвоении магния и рациональным концентрациям меди и молибдена в ВЧ.

После изотермической закалки металлическая основа преобразовалась в бейнитную структуру с шаровидный графитом (рис. 6.9).

Среднее значение предела прочности в термообработанном состоянии равнялось 1312,8 МПа, а относительное удлинение в среднем достигло 3,43% (табл. 6.16), что удовлетворяет требованиям ТУ3183-163-01124323 и резко повышает эксплуатационную надежность отливок.

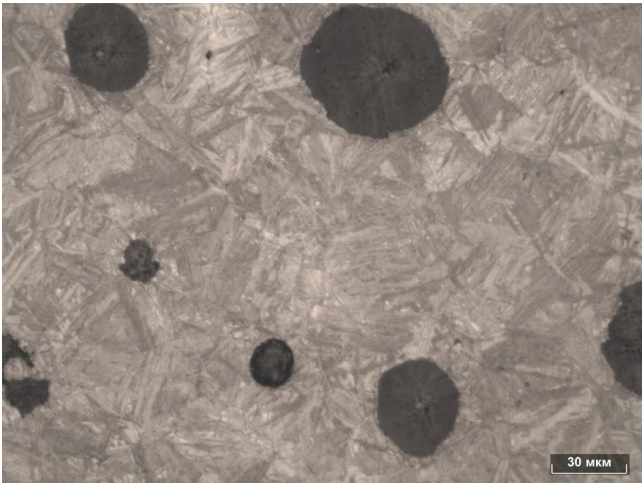


Рисунок 6.9. Микроструктура ВЧ 120. Бейнит и шаровидный графит

Таким образом, при производстве отливок «клин фрикционный» из ВЧ120 достигли оптимальных технологических решений в плавке, модифицировании, заливке чугуна и термообработке, обеспечивающих выполнение требований технических условий 3183-163-01124323 к качеству отливок из чугуна ВЧ120 и резко повышающих эксплуатационную надежность отливок [290].

Выводы по главе 6

1. В Рубцовском филиале АО «Алтайвагон» внедрен разработанный способ диффузионного раскисления стали 20ГФЛ с применением РДА для ответственных железнодорожных отливок массой от 1 до 100 кг.

В результате применение РДА способствовало активизации процесса десульфурации. Концентрация серы уменьшилась с 0,0136 до 0,0102%, то есть на 25%. Микроструктура стали после внедрения стала чище по неметаллическим включениям. Индекс загрязненности в среднем уменьшился с 1,74 до 1,35 (10^{-3}). Это позволило обеспечить высокие механические свойства стали. Среднее значение KCV^{-60} до внедрения равнялось 299,77 кДж/м^2, а после внедрения повысилось до 380,84, то есть на 21,3%. Таким образом, внедрение позволило резко повысить эксплуатационную надежность всей номенклатуры ответственного стального железнодорожного литья.

2. В АО «Керченский металлургический завод» внедрили производство особо ответственных железнодорожных отливок «крестовины железнодорожные» из стали 110Г13Л методом переплава с использованием разработанного технологического процесса с применением РШ, РДА и РСУ. Сравнили показатели механических свойств для отливок «крестовины

железнодорожные» выплавленные методами окисления и переплава для оценки эффективности разработанного метода. Механические свойства выплавленных сталей в среднем соответствовали 1-й группе качества. Брака отливок по механическим свойствам не было. Таким образом, подтверждено, что внедрение разработанного способа выплавки стали 110Г13Л методом переплава обеспечивает необходимую эксплуатационную надежность отливок «крестовины железнодорожные». Внедрение прогрессивной технологии позволило обеспечить экономический эффект свыше 48 млн рублей.

3. Внедрение разработанного технологического процесса выплавки стали 110Г13Л методом переплава с использованием РШ для раннего наведения шлака, РДА для диффузионного раскисления стали и РСУ для внепечной обработки стали в ПАО «Михайловский ГОК» показали их высокую эффективность по сравнению с применяемыми на заводе модификаторами L-Cast® 5.3 и L-Cast® 720Z.

Внедрение инновационного технологического процесса в производство, позволило существенно повысить технологичность процесса выплавки стали, качественные показатели стали и получить экономический эффект 111 рублей на одну тонну выплавленного металла.

4. Внедрение в производство комплексной обработки сталей 110Г13Л, выплавляемых методом переплава с использованием материалов, РШ, РДА и РСУ в ПАО «Оскольский завод металлургического машиностроения» существенно повысило результативность раскисления и рафинирования стали, увеличило ее жидкотекучесть, позволило удешевить процесс и экономить электроэнергию. Обеспечена высокая эксплуатационная надежность отливок и расширена номенклатура литья, выплавляемых методом переплава.

5. В ОАО «Копейский машиностроительный завод» внедрен разработанный способ выплавки стали в дуговой электропечи с кислой футеровкой, включающий дополнительное введение восстановительного периода плавки, где используют две раскислительные порошковые смеси, в процессе диффузионного раскисления РД19П и РД21П. Внедрение новой технологии позволило снизить температуру заливки стали на 20 °С, существенно уменьшить трудоемкость удаления пригара и значительно повысить механические свойства стали отливок турель и опора. $\sigma_в$ увеличилось с 594 до 661 МПа, то есть на 10,1%, а δ — с 13,6 до 16,6%, что на 18% выше. В результате выросла и эксплуатационная надежность горнопроходческих комбайнов.

6. В ОАО «Анжеромаш» внедрение нового способа выплавки стали в кислых печах при изготовлении литых заготовок ответственного назначения для редукторов, установленных на комбайнах из конструкционной легированной стали 25ГСЛ привело к повышению самого важного показателя, характеризующего устойчивость к динамическим нагрузкам ударной вязкости, на 19 — с 62,08 до 77,2 Дж/см^2. Таким образом, резко повысилась эксплуатационная надежность проходческих комбайнов. За счет экономии

материальных затрат получен экономический эффект в размере 151,32 руб. т/ж.

7. АО «Благовещенский арматурный завод» освоил производство ответственных железнодорожных отливок «клин фрикционный» из чугуна марки СЧ35. На заводе достигли оптимальных технологических решений в плавке, заливке чугуна и формовке отливок, обеспечивающих выполнение требований технических условий к качеству отливок из чугуна СЧ35, минимальный брак и высокую эксплуатационную надежность отливок. Намечены пути дальнейшего повышения качества литья. Разработаны технологические процессы получения отливок «клин фрикционный» из ВЧ120 с применением комплексного дисперсного модификатора МК82, с выплавкой чугуна в индукционной и дуговой электропечах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Монография посвящена решению важной научно-технической задачи создания новых технологических процессов выплавки и внепечной обработки сталей и чугунов для производства ответственных чугунных и стальных отливок с использованием разработанных смесевых дисперсных материалов. На базе разработанных технологических процессов в условиях ООО «Металлург» СОАЛ создано производство по выпуску смесевых дисперсных модификаторов, раскисляющих и рафинирующих смесей мощностью 1200 т/год.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Выявлена основная номенклатура ответственных отливок в народном хозяйстве, для которых особенно актуально повышение эксплуатационной надежности. Это ответственные отливки для нужд РЖД: крестовины железнодорожные и стрелочные переводы из стали 110Г13Л; литые детали вагонных тележек (надрессорные балки и боковые рамы) и отливки для автоматической сцепки железнодорожных вагонов из стали 20ГЛ; корпуса фрикционные с увеличенным коэффициентом запаса сопротивления усталости из чугуна СЧ35. Это также ответственные отливки для нужд горнодобывающего и шахтного оборудования: зубья ковшей экскаваторов, гусеничные звенья, рабочие органы дробильного оборудования, работающие в условиях низких температур из стали 110Г13Л, крупногабаритные отливки для проходческих и выемочных комбайнов (турель и опора) из стали 35ХНМЛ, корпуса редукторов для комбайнов для подземной добычи полезных ископаемых из стали 25ГСЛ. Хладостойкие отливки корпусных деталей трубопроводной арматуры для магистральных нефте- и газопроводов, изготавливаемые из стали 20ГЛ.

2. Разработаны технологические решения, направленные на повышение эксплуатационной надежности выявленной номенклатуры отливок с использованием созданных смесевых дисперсных материалов при выплавке и внепечной обработке расплавов.

3. Обоснован выбор наиболее важных дисперсных компонентов для созданных смесей, которыми являются углеродсодержащий материал (УСМ), кремнийсодержащий материал (КСМ), а также модификатор КСК — кальций-стронциевый карбонат со средними размерами частиц порошков, равных 13,21; 17,12 и 20 мкм, и подтвержден в программном комплексе FLOW-3D характером движения частиц в жидком чугуне при заполнении им полости литейной формы ответственной железнодорожной отливки «корпус фрикционный». В этой же программе подтвердили рафинирующую способность газа, образующегося при диссоциации карбонатов КСК, за счет флотации.

4. Теоретически обоснованы рациональные составы разжижителя шлака РШ, диффузионных раскислительных смесей РД для основных и кислых

печей, рафинирующей смеси универсальной РСУ, а также модификаторов комплексных МК для использования в печах с основной и кислой футеровками. Дисперсность новых разработанных материалов обуславливает возрастание их реакционной способности по сравнению с существующими за счет резкого увеличения количества химически активных частиц в металлических расплавах и шлаках, что усиливает результативность рафинирования и модифицирования стали и чугунов, повышает их механические свойства.

5. Разработан и внедрен в действующее производство комбинированный способ выплавки стали 110Г13Л методом переплава. Новая технология основана на использовании трех направлений интенсификации выплавки стали: раннего наведения шлака с использованием РШ, что позволяет уменьшить время плавления шихты, экономить электроэнергию, гарантировать низкий угар марганца во время плавления и обеспечить низкие концентрации MnO и FeO в шлаках. Использование РДА во время диффузионного раскисления позволяет эффективно раскислять шлак, увеличивать его основность, уменьшать концентрации MnO и FeO в нем и получать белые рассыпчатые шлаки. В заключение производится ковшевая обработка расплава РСУ, которая позволяет достичь снижения концентрации MnO в шлаках в пределах 4–5%, а FeO — 0,35–0,45%. Разработанная технология выплавки обеспечивает надежное получение высоких механических и служебных свойств отливок из стали, отвечающие требованиям НТД. Разработанная технология внедрена при производстве ответственных отливок «крестовины железнодорожные»:

– в АО «Керченский металлургический завод» при внедрении резко повысились механические свойства сталей и эксплуатационная надежность отливок. Они соответствовали требованиям 1-й и 2-й групп. Сопоставимые свойства получались только при использовании метода окисления. Это позволило переплавить годами копившийся брак и обеспечить экономический эффект в размере 48 млн руб.;

– в АО «Муромский стрелочный завод» внедрение позволило резко повысить эксплуатационную надежность отливок. Количество плавок первой группы увеличилось с 29,3 до 72,2%. Экономический эффект от внедрения составил 1768 рублей на каждую плавку.

– в ПАО «Михайловский ГОК» внедрение технологии при производстве отливок конусов дробилок, зубьев ковшей экскаваторов и других ответственных отливок позволило резко повысить KCU стали на 15,6% с 2110 до 2500 кДж/м^2, увеличить эксплуатационную надежность отливок и обеспечить экономический эффект 888 рублей на одну плавку.

6. Разработан и внедрен в действующее производство способ диффузионного раскисления стали с помощью дисперсного смесевого раскислителя РДА для повышения эксплуатационной надежности ответственных железнодорожных отливок «балка надрессорная» и «рама боковая». За счет дисперсности компонентов смеси реакционная способность

РДА, а значит, и интенсификация химических взаимодействий при раскислении резко возрастет в 75 раз. Способность РДА принудительно вспенивать шлак создает благоприятный тепловой режим для активизации процесса десульфурации и раскисления стали:

– в Рубцовском филиале АО «Алтайвагон» при выплавке стали 20ГФЛ для производства отливок «рама» и «балка» внедрили диффузионное раскисление стали РДА взамен смеси из коксика, дробленного ФС75 и алюминиевой крошки, что позволило снизить концентрации серы в расплаве с 0,01363 до 0,0102%, то есть на 25,2%. В результате выросли средние значения KCV^{-60} после внедрения с 299,7 до 380,4 кДж/м^2, то есть на 21,2%. Это повысило эксплуатационную надежность отливки, что подтверждено расширенными испытаниями на стендах; и позволило увеличить нагрузку на ось тележки грузового вагона с 23,5 до 25,0 тс.

– в ООО «ВКМ-Сталь» внедрение диффузионного раскислителя РДА одинаково эффективно обеспечило требуемую эксплуатационную надежность отливок рама и балка как при плавке стали 20ГЛ в печах постоянного, так и переменного тока. Доказана высокая сопоставимость результатов выплавки сталей в тех и других печах. Это дало возможность снять один из дискуссионных вопросов, стоящих при выборе печей для выплавки стали;

– промышленные испытания дисперсного РДА в АКП В ООО «БВК» (г. Челябинск) при выплавке сталей для ответственного литья корпусных деталей трубопроводной арматуры подтвердили теоретические предпосылки и высокую результативность РДА по сравнению с раскислителем АШБ, применяемым на заводе. Средние значения KCV^{-60} после внедрения РДА на отливках «клиновые задвижки» из стали 20Л выросли на 6,4% с 295,3 до 314,1 кДж/м^2, что очень важно при эксплуатации отливок в условиях Крайнего Севера.

7. Разработан и внедрен способ выплавки стали в дуговой электропечи с кислой футеровкой. Новая технология отличается тем, что после окислительного периода и перед доводкой расплава по химическому составу в нее дополнительно введен восстановительный период плавки, где используют две раскислительные порошковые смеси, причем сначала осуществляют присадку первой смеси РД19П, которая разжижает, вспенивает шлак, создает благоприятный температурный режим для эффективного рафинирования расплава второй смесью. Вторую раскислительную порошковую смесь РД21П подают на вспененный шлак, после чего начинается активное восстановление FeO и MnO. Неуклонный рост температуры способствует развитию эндотермических реакций восстановления Si из SiO_2, результат которых позволяет экономить ферросилиций. Затем во время выпуска металла в ковш дополнительно проводят внепечную обработку расплава в ковше, для чего используют рафинирующую смесь РСУ для дальнейшего рафинирования расплава,

повышения механических свойств и эксплуатационной надежности отливок:

– внедрение технологического процесса в ООО «Ростовский литейный завод» при выплавке стали 35Л в печах с кислой футеровкой позволило сократить время плавки на 10 минут. Активизация реакций восстановления из шлака Mn, Fe, а также Si за счет развивающегося кремнийвосстановительного процесса, позволило экономить ферросплавы ФС45 и ФМн78 в количестве 4 и 2,4 кг/т жидкого соответственно. У рафинированного металла повысилась жидкотекучесть. Устранен брак по недоливам и неспаям.

– внедрение технологии в ОАО «Копейский машиностроительный завод» позволило при производстве крупногабаритных отливки ответственных отливок «турель» и «опора» из стали 35ХМЛ снизить температуру заливки на 20 °С и резко снизить трудоемкость удаления пригара. Кроме того, увеличились $\sigma_в$ с 584 до 594 МПа, а δ — с 15 до 16,8%, что обеспечило требуемую эксплуатационную надежность отливок;

– в АО Рубцовский филиал АО «Алтайвагон» эффективное рафинирование металла в печи РД и внепечная обработка стали РСУ в ковше позволили существенно повысить относительное удлинение стали 20ГЛ с 26,05 до 28,38% и ударную вязкость с 710,6 до 1013,6 кДж/м^2, то есть на 8,21 и 29,2% соответственно, что дало возможность расширить номенклатуру ответственного железнодорожного литья, выплавляемого в печи с кислой футеровкой, обеспечив при этом эксплуатационную надежность и снижение себестоимости литья. За счет внедрения обеспечена требуемая эксплуатационная надежность ответственных отливок «корпус» и «горловина корпуса» из стали 30 ГСЛ-Б для аппаратов, поглощающих пружинно-фракционных;

– в АО «ВКМ — Сталь» внедрение разработанного способа при производстве отливок «корпус автосцепки» из стали 20ГЛ, выплавленной в кислой печи способствовало существенному снижению серы в расплаве в среднем с 0,0302 до 0,0204%, то есть на 25,8%. Кроме того, увеличивается $\sigma_Т$ в среднем с 484 до 551 Дж/см^2, то есть на 12%, а $\sigma_В$ увеличивается с 637 до 713 Дж/см^2, то есть на 11%. Это дало возможность автосцепному устройству выдерживать высокие растягивающие нагрузки и повысить эксплуатационную надежность автосцепки.

8. Разработаны смесевые дисперсные модификаторы серии МК, показавшие свою результативность при получении ответственной железнодорожной чугунной отливки «клин фрикционный». Разработаны рациональные сочетания разработанных дисперсных графитизирующих модификаторов с традиционными графитизирующими и сфероидизирующими, обеспечивающие при комплексном модифицировании стабильное получение чугунов марок СЧ35 и ВЧ120 для отливки «клин фрикционный».

9. ООО «Металлург» СОАЛ в 2024 г. произвел и реализовал 1045 тонн разработанной и запатентованной продукции. Выручка составила 71,2 млн

рублей. Уплачено налогов и сборов в казну государства 10,9 млн рублей. За счет реализации продукции в 2024 году и использовании ее на предприятиях РФ получен экономический эффект 53 683 000 (пятьдесят три миллиона шестьсот восемьдесят три тысячи) рублей.

ЭПИЛОГ

Андрей Чайкин
Ода металлургам и литейщикам

Мой первый завод после вуза
Запомнился мне техпроцессом
И тем, что мы с другом из группы
Идем покорять ОГМет.
Идем по литейному цеху
В поисках смысла жизни
Или смысла работы хотя бы,
А находим болезни легких
В неполные тридцать лет.
Куда занесло нас по жизни,
Мы поняли через месяц,
И мой одногруппник решился
Уйти из литья навсегда,
А я ненадолго остался
(Не зря же учился 6 лет).
Мой друг вскоре женился
На очень горячей даме,
И семейная жизнь закипела —
Вот такой вот удачный брак!
А мне брак совершенно не нужен
(Ну, максимум три процента),
И горячую даму свою
Я любовно вагранкой зову
(Хотя по факту она ДСП,
И закипает она каждый день,
Хотя намного старше меня!).
Мой друг едет на встречу
На новом автомобиле,
Улыбается этому факту
И машет мне из окна.
А я еду в старой маршрутке,
И в этом есть масса плюсов:
1) еду стоя и 2) до конечной,
И 3) без сдачи передал за проезд
((4) да и масса пассажиров маршрутки
Равна завалке моей ДСП).
Мой друг рассчитался с кредитом
И с ипотекой тоже,
Поскольку прибыль на фирме
Выросла за квартал.
А я рассчитал прибыль,
Шихту, литники и питатель
(При этом прибыль моя
Ни капельки не возросла).
Мой друг загорает в Египте,
В Турции и в Таиланде
И на Мальдивы, возможно,
Поедет на Новый год.
У меня на лице загар ярче,
Никакие крема не помогут,
Если долго смотреть на плавке
В завалочное окно.
(И пусть по факту лишь лицо
загорает,
Зато сам этот факт налицо).
Для продолжения рода
У друга уже двое детишек,
Которые мечтают, конечно,
Продолжить дело отца.
А мне для продолжения смены
Нужно два электрода
Поскорее сменить на печке
И утром пойти домой.
(Хотя зачем куда-то идти,
Когда работа — твой дом?!)
Мой друг каждый раз при встрече
Горюет, что ушел из литейки.
Он вообще давно спился и умер.
И я его хоронил.
Мой друг — это я из реальности,
Которая параллельна нашей,
Поэтому с ней пересечься
Невозможно никак.
Но мне это вообще параллельно —
Я уже металлург главный,
То есть главное я все-таки сделал:
Я покорил ОГМет!

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дибров И. А. Состояние и перспективные направления развития литейного производства России / И. А. Дибров // Тр. XII съезда литейщиков России. — НГТУ им. Р. Е. Алексеева. — Н. Новгород. — 2015. — Т. 2. — 520 с.

2. Дибров И. А. Состояние и перспективы развития литейного производства России / И. А. Дибров // Тр. восьмого съезда литейщиков России. — Ростов на/Д. — 23–27 апреля 2007. — С. 3–11.

3. Дибров, И. А. Качественное литье — прогресс машиностроения / И. А. Дибров // Литейщик России. — № 8. — 2017. — С. 18–27.

4. Сталь на рубеже столетий / Колл. авторов ; под научн. ред. Ю. С. Карабасова. — М. : МИСиС, 2001 — 664 с.

5. Сычков А. Б. Выбор способа раскисления и модифицирования стали / А. Б. Сычков, В. А., М. В. Потапова, М. К. Исаев // Сб. тр. 15 междунар. конгр. сталеплавильщиков и производителей металла. — М. : РПК ПринтАП, 2014. — С. 585–592.

6. Комплекс технологических и технических решений снижения энерго- и материалоемкости процесса выплавки стального полупродукта в современных ДСП / М. В. Зуев, А. А. Бабенко, С. П. Бурмасов, Е. Г. Житлухин [и др.] // Сб. тр. 13 междунар. конгр. сталеплавильщиков и производителей металла. — М. : Эзапринт, 2014. — С. 54–59.

7. Солнцев Ю. П. Хладостойкие стали и сплавы / Ю. П. Солнцев. — СПб. : Химиздат, 2017. — 476 с.

8. Нехендзи Ю. А. Стальное литье : учебник для металлургических и политехнических институтов / Ю. А. Нехендзи. — М. : Металлургиздат, 1948. — 766 с.

9. Бидуля П. Н. Технология стальных отливок : учеб. пособие для металлургич. и машиностроит. вузов и фак-в. — М. : Металлургиздат, 1961. — 352 с.

10. Производство стальных отливок : учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности 110400 «Литейн. пр-во чер. и цв. металлов» / Л. Я. Козлов, В. М. Колокольцев, К. Н. Вдовин [и др.] ; под ред. Л. Я. Козлова. — М. : МИСиС, 2003. — 350 с.

11. Рябчиков И. В. Материалы для внепечной обработки железоуглеродистых расплавов / И. В. Рябчиков // Металлургия машиностроения. — 2005. — № 2. — С. 32–39.

12. Рябчиков И. В. История развития модификаторов / И. В. Рябчиков // Металлургия машиностроения. — 2006. — № 2. — С. 2–4.

13. Ковалевич Е. В. Теоретические основы и практика получения чугуна с шаровидным графитом мелкодисперсными модификаторами : дис. … д-ра техн. наук / Е. В. Ковалевич. — М. : ЦНИИТМАШ, 1996. — 311 с.

14. Давыдов С. В. Технология наномодифицирования доменных и ваграночных чугунов / С. В. Давыдов // Заготовительное производство. — 2005. — № 2. — С. 3–9.

15. Калинин В. Т. Научные основы прогрессивных технологий модифицирования и легирования чугунов для отливок металлургического оборудования : автореф. дис. … д-ра техн. наук / В. Т. Калинин. — Днепропетровск, 2005. — 38 с.

16. Смесевые модификаторы для чугунов / Н. И. Кобелев, А. В. Козлов, С. С. Зуйков [и др.] // Литейное производство. — 1989. — № 12. — С. 6–8.

17. Леках С. Н. Внепечная обработка высококачественных чугунов в машиностроении / С. Н. Леках, Н. И. Бестужев. — Минск : Навука и тэхніка, 1992. — 269 с.

18. Чайкин А. В. Научные основы инновационных технологий печной и внепечной обработки чугунов и сталей для отливок ответственного назначения : Монография / А. В. Чайкин. — СПб. : Наукоемкие технологии, 2022. — 245 с.

19. О стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года. Распоряжение Правительства РФ от 17. 06. 2008. — № 877-р. Дата официального опубликования: 30.03.2011.

20. Методические положения по определению значений основных параметров условий организации перевозочного процесса при внедрении вагонов с повышенной осевой и погонной нагрузкой / М. И Мехедов, Е. А. Сотников, П. С. Холодняк [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). — 2022. — № 81(4). — С 359–369.

21. Boronenko Yu. Influence of construction schemes and parameters of three-piece freight bogies on wagon stability, ride and curving qualities / Yu. Boronenko, A. Orlova, E. Rudakova // Vehicle System Dynamics. — Vol.44. — 2006. — P. 402–414.

22. Orlova A. Refining the wedge friction damper of three-piece freight bogies / Orlova, Yu. Romen // Vehicle System Dynamics. — Vol. 46. — Issue 1&2. — 2008. — P. 445–455.

23. Orlova A. Tuning von Guterwagendrehgestellen durch Radsatzkopplungen / A. Orlova, Yu. Boronenko, H. Scheffel, R. Froling, W. Kik // ZEVrail Glasers Annalen. — 126 Tagungsband SFT Graz . — 2002. — P. 270–282.

24. Patent 2005/0268813 A1, USA, Int. Cl. B61F5/26. Railway trucks pedestal bearing adapter / Charles L. Van Auken; Amsted Industries Inc. — № 10/856, 830; filed 01.01.04 ; publ. 30.12.04.

25. Scholdan D. RC25NT — new freight car bogie, self steering, three piece, friction damped / D. Scholdan, W. Kik // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты (6.07 — 10.07.2011) : Тез. докл. VII Междунар. научн.-техн. конф. — СПБ. : ПГУПС, 2011. — С. 19–21.

26. Певзнер В. О. Обобщение зарубежного опыта по воздействию на путь грузовых вагонов с осевой нагрузкой 25 т/ось. Внедрение современных

конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство / В. О. Певзнер, О. Ю. Белоцветова // 9-я науч.-практ. конф. с междунар. участием МГУПС МИИТ. — М. : Из-во АИСнТ, 2016. — С. 182–187.

27. Расчетно-экспериментальная оценка ресурса рамы тележки и промежуточной рамы восьмиосного тепловоза / С. В. Чунин, А. С. Гасюк, М. В. Тимаков [и др.] / Вестник ВНИИЖТ. — 2023. — № 82(4). — С 335–346.

28. Бороненко Ю. П., Ведение показателей энергоэффективности грузовых вагонов — резерв энергосбережения на железнодорожном транспорте / Ю. П. Бороненко, А. А. Комайданов // Железнодорожный транспорт. — 2023. — № 6. — С. 34–39.

29. «Амстед Рейл» — инновации для российских железных дорог // Евразия — вести. — 2012. — № 9. — С. 31.

30. ГОСТ 32400-2013 «Рама боковая и балка надрессорная литые тележек грузовых вагонов. Технические условия». — М. : Стандартинформ, 2014. — 49 с.

31. Нагруженность и износ автосцепок в пассажирском вагоне локомотивной тяги / А. В. Белянкин, В. В. Балакин, В. К. Мешков, М. А. Федоров // Вестник ВНИИЖТ. — Т. 83. — № 2. —2024. — С. 101–110.

32. ГОСТ 22703-2012. Детали литые сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия. — М. : Стандартинформ, 2013. — 8 с.

33. Краткий обзор применения гасителей колебаний в конструкциях рессорного подвешивания подвижного состава железнодорожного транспорта и анализ их достоинств и недостатков / С. В. Трескин, Е. Ю. Дульский, В. А. Кручек, П. Ю. Иванов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2025. — № 1 (85). — С. 34–45.

34. Solonenko V. Modeling of dynamic characteristics of freight car withoptimized parameters of wedge-type shock absorber / V. Solonenko, N. Mahmetova, J. Musayev, M. Kuashnin, A. Zhauyt, T. Buzauova // JVE INTERNATIONAL LTD. JOURNAL OF VIBROENGINEERING. — 2017. — Vol. 19. — Issue 2. — P. 1197–1213.

35. Сухов А. В. Оценка фрикционных свойств в парах трения клинового гасителя колебаний тележки грузового вагона / А. В. Сухов, Б. В. Борщ, А. В. Габец // Вестник ВНИИЖТ. — 2015. — № 2. — С. 32–37.

36. Шемонаева Г.А. Пути повышения надежности работы литых деталей «рама боковая» и «балка надрессорная» в условиях отрицательных температур / Г. А. Шемонаева, Е. И. Бобкова // Литейное производство сегодня и завтра: Тр. 9-й междунар. науч.-практ. конф. / под ред. Г. А. Косникова. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — С. 268–276.

37. ТУ 3183-234-01124323-2007 «Клин фрикционный из серого чугуна для тележек грузовых вагонов». — М. : ВНИИЖТ. — 6 с.

38. Глюзберг Б. Э. Актуальные проблемы стрелочного хозяйства / Б. Э. Глюзберг // Железнодорожный транспорт. — 2017. — № 7. — С. 45–48.

39. ГОСТ 7370-2015. Крестовины железнодорожные. Технические условия. — М. : Стандартинформ. — 2015. — 62 с.

40. Солнцев Ю. П. Литейные хладостойкие стали / Ю. П. Солнцев, А. К. Андреев, Р. И. Гречин. — М. : Металлургия, 1991. — 175 с.

41. Солнцев Ю. П. Стали для Севера и Сибири : учеб. пособие / Ю. П. Солнцев, Т. И. Титова. — СПб. : Химиздат, 2002. — 352 с.

42. ГОСТ 21357-87. Отливки из хладостойкой и износостойкой стали. Общие технические условия. М. : ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ». — 1987. — 83 с.

43. ГОСТ 33260-2015. Арматура трубопроводная, металлы, применяемые в арматуростроении. Основные требования к выбору материалов. М. : ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2015. — 69 с.

44. Шемонаева Г. А. Работы ОАО «ЦНИИМ» в области литейного производства / Г. А. Шемонаева, А. А. Абрамов // Литейное производство. — 2012. — № 7. — С. 2–5.

45. Излом боковой рамы тележки грузового вагона. Анализ технологии производства, пути устранения дефектов / А. В. Монастырский, В. М. Бубнов, С. П. Котенко [и др.] // Литейное производство. — № 11. — 2012. — С. 22–25.

46. Направления работ отдела литейных процессов ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» // Литейное производство. — № 1. — 2015. — С. 39–41.

47. Быков Б. В. Конструкция тележек грузовых и пассажирских вагонов : иллюстрированное учеб. пособие / Б. В. Быков. — М. : Маршрут, 2004. — 36 с.

48. Брылова Т. Б. Оценка влияния ликвации на трещинообразование боковых рам из стали 20ГЛ / Б. В. Быков. — Материалы третьей всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием в трех частях. Ч. 3. Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск, 2015. — С. 19–26.

49. Конькова Т. Е. Возрастной спектр и служебные характеристики надрессорных балок и боковых рам тележек грузовых вагонов / Т. Е. Конькова // Сб. науч. тр. ВНИИЖТ: Железнодорожный транспорт на современном этапе. Задачи и пути их решения. — М. : Интекст, 2008. — С. 43–50.

50. Steel castings. Association of American Railroads Mechanical Division/ Manual Standards and Recommended Practices: Specifications. M201-84. — 1984. — 9 p.

51. Конькова Т. Е. О путях повышения эксплуатационной надежности стальных литых деталей тележек грузовых вагонов / Т. Е. Конькова // Вестник ВНИИЖТ. — 2009. — № 1 — С. 22–26.

52. Шемонаева Г. А. О надежности литых деталей рама боковая и балка надрессорная при отрицательных температурах / Г. А. Шемонаева, Е. И. Бобкова // Литейное производство. — № 10. — 2012. — С. 19–20.

53. Воронин Ю. Ф. Формирование труднораспознаваемых дефектов в отливке рама боковая / Ю. Ф. Воронин, С. Ю. Воронин // Литейное производство. — № 10. — 2012. — С. 23–25.

54. Напряженно-деформированное состояние кристаллизующихся стальных отливок / Л. В. Десницкая, В. В. Десницкий, И. А. Матвеев // Литейное производство сегодня и завтра: Тр. 12-й междунар. науч.-практ. конф. / под ред. Г. А. Косникова. — СПб. : Изд-во «Культ-информ-пресс», 2018. — С. 181–186.

55. Десницкий В. В. Создание литейных технологий для стальных деталей ответственного назначения / Л. В. Десницкая, В. В. Десницкий, И. А. Матвеев // Литейное производство сегодня и завтра: Тр. 12-й междунар. науч.-практ. конф. / под ред. Г. А. Косникова. — СПб. : Изд-во «Культ-информ-пресс», 2018. — С. 187–199.

56. Воронин Ю. Ф. О повышении качества и надежности железнодорожной отливки рама боковая / Ю. Ф. Воронин, С. Ю. Воронин // Литейное производство. — 2012. — № 5. — С. 15–17.

57. Шемонаева Г. А. Влияние термической обработки и химического состава стали 20ГЛ на стабильность значений ударной вязкости KCV при –60 °С / Г. А. Шемонаева, Е. И. Бобкова // Литейное производство сегодня и завтра: Тр. 8-й междунар. науч.-практич. конф. / под ред. Г. А. Косникова. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — С. 229–236.

58. Андреев В. В. Особенности формирования литой структуры высокопрочных чугунов и разработка эффективных технологий изготовления отливок с высокими параметрами эксплуатационных свойств : дис. … д-ра техн. наук в виде науч. докл. / В. В. Андреев. — М. : НПО «ЦНИИТМАШ». — 2012. — 80 с.

59. Panov A. G. About the Possibility of Increase in CGI Properties by Austempering / A. G. Panov, D. A. Gurtovoy, I. F. Shaekhova // Solid State Phenomena. — Vol. 284. — 2018 — P. 224–228.

60. Ovali, I. Production of surface chilled ductile iron Herstellung von oberflächengekühltem schmiedbarem Gusseisen / I. Ovali, V. Kilicli, M. Erdogan // Mat.-wiss. u. Werkstofftech. — 2015. — 46. No 9. — P. 949–961.

61. Великанов А. В. Фрикционные клинья из высокопрочного чугуна / А. В. Великанов, Б. В. Борщ // Вестник ВНИИЖТ. — 2007. — № 2. — С. 18–22.

62. Технология производства, качество и работоспособность закаленных фрикционных клиньев из высокопрочного чугуна / А. В. Великанов, Б. В. Борщ, В. М. Федин [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. — 2007. — № 5. — С. 19–24.

63. Goodrich G. M. Effect of Cooling Rate on Pearlitic Ductile Iron Mechanical Properties / G. M. Goodrich, R. W. Lobenhofer // AES Transactions. — 2007. — Vol. 115. — P. 547–566.

64. Tuttle R. B. Effect of Cooling Rate on the Mechanical Properties of a Fully Pearlitic Ductile Iron / R. B. Tuttle // AFS Transactions. — 2010. — Vol. 118. — P. 243–264.

65. Попель П. С. Структура жидких металлов и сплавов и возможности ее регулирования для повышения качества отливок / А. В. Великанов, Б. В. Борщ, В. М. Федин [и др.] // Литейщик России. — 2002. — № 2. — С. 14–16.

66. Позднее графитизирующее модифицирование чугунов — важный элемент производства качественных отливок / С. П. Королев, В. М. Михайловский, А. Г. Шешко [и др.] // Литейное производство. — 2009. — № 12. — С. 8–12.

67. Исследование структурообразования расплавов чугунов / А. Г. Панов, В. В. Конашков, В. С. Цепелев [и др.] // Литейщик России. — 2010. — № 3. — С. 32–38.

68. О возможности повышения свойств ЧВГ с помощью изотермической закалки / Г. Панов, Д. А. Гуртовой, Э. С. Закиров [и др.]. // Литейное производство. — 2018. — № 2. — С. 13–16.

69. О возможности повышения свойств ЧВГ с помощью изотермической закалки / А. Г. Панов, Д. А. Гуртовой, Э. С. Закиров [и др.]. // Литейное производство. — 2018. — № 2. — С. 13–16.

70. Бейнитный высокопрочный чугун с шаровидным графитом / Г. И. Сильман, К. В. Макаренко, В. В. Камынин, Е. А. Зенцова // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2013. — № 4. — С. 3–8.

71. Панов А. Г. Практика обработки карбонатами ЩЗМ расплавов дуговой плавки при изготовлении отливок из высокопрочного чугуна / А. Г. Панов, Д. А. Гуртовой // Литейщик России. — 2012. — № 8. — С. 25–27.

72. Мазинский Д. А. Сталь Гадфильда и ее исключительное место в металлургии / Д. А. Мазинский // Результаты прикладных и поисковых научных исследований в сфере естествознания и технологий : сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 27 декабря 2019, г. Белгород. — Белгород : ООО Агентство перспективных научных исследований (АПНИ), — 2019. — С. 90–93.

73. Выплавка высокомарганцовистой стали в дуговой сталеплавильной печи. Технология. Сообщение 1 / К. Н. Вдовин, Н. А. Феоктистов, Е. В. Синицкий [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 2015. — Т. 58. — № 10. — С. 735–739.

74. Давыдов Н. Г. Высокомарганцовистая сталь / Н. Г. Давыдов. — М. : Металлургия, 1979. — 176 с.

75. Исследование возможности повышения надежности литых крупногабаритных изделий для горного оборудования / Т. Р. Гильманшина, Д. Ю. Крицкий, С. И. Тюрин [и др.] // Интернет-журнал «Науковедение». — 2017. — Т. 9 — № 2. (2017). — URL: http://naukovedenie.ru/PDF/96TVN217.pdf (дата обращения: 28.03.2026). — Режим доступа: свободный. — [Загл. с экрана. Яз. рус., англ.].

76. Шаров Н. В. Опыт изготовления быстроизнашиваемых деталей из высокомарганцовистых сталей / Н. В. Шаров, А. В. Платонов, В. А. Чумаков // Литейное производство. — № 10. — 2012. — С. 17–19.

77. Гребнев Ю. В. Совершенствование технологии выплавки стали 110Г13Л / Ю. В. Гребнев, Н. И. Габельченко, И. А. Хмуров // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2014. — Т. 9. — Вып. 9. — С. 129–132.

78. Chena C. Effect of N+Cr alloying on the microstructures and tensile properties of Hadfield steel / C. Chena, F. Zhang, F. Wang, H. Liuc, B. Yu // Materials Science & Engineering. — 679 (2017). — P. 95–103.

79. Yan W. Effect of surface nanocrystallization on abrasive wear properties in Hadfield steel / W. Yan, L. Fang, Zh. Zheng, K. Sun, Y. Xu // Tribology International. — 2009. — Vol. 42. — Iss. 5. — P. 634–641.

80. Qichuan J. Abrasion-resistant as-cast manganese steel with nodular carbide modifiec by calcium / J. Qichuan, H. Zhenming, C. Donghuan, W. Shoushi, Y. Jiulin // Journal of Materials Science Letters. — 1990. — Vol. 9. — Iss. 5. — P. 616–617.

81. Chen C. Strain hardening and nanocrystallization behaviors in Hadfield steel subjected to surface severe plastic deformation / C. Chen, L. Bo, X. Fenga, Z. Fucheng, B. Hossein // Materials Science & Engineering. — 729 (2018). — P. 178–184.

82. Mohamed K. Ladle-treated high manganese steel reinforced by Cr7C3 phase / K. Mohamed // International journal of cast metals research. — 2017. — Vol. 30. — Iss. 2. — P. 81–86.

83. Atabaki M. M., Jafari S., Abdollah-Pour H. Abrasive wear behavior of high chromium cast iron and Hadfield steel — A comparison / M. M. Atabaki, S. Jafari, H. Abdollah-Pour // Journal of Iron and Steel Research International. — 2012. — Vol. 19. — Iss. 4. — P. 43–50.

84. Nasajpour A. Effect of molybdenum on mechanical and abrasive wear properties of coating of as weid Hadfield steel with flux-cored gas tungsten arc welding / A. Nasajpour, A. H. Kokabi, R. Davami, S. Nikzad // Journal of Alloys and Compounds. — 2016. — Vol. 659. — P. 262–269.

85. Mejia I. Sliding wear behavior of a high — Mn austenitic twinning induced plasticity (TWIP) steel microalioyed with Nb / I. Mejia, A. Bedolla-Jacuinde, J. R. Pablo // Journal of Alloys and Compounds. — 2013. — Vol. 301. — Iss. 1–2. — P. 590–597.

86. Скляр В. О. Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии : учеб. пособие / В. О. Скляр. — Донецк : ДонНТУ, 2014. — 224 с.

87. Воскобойников В. Г. Общая металлургия / В. Г. Воскобойников, В. А. Кудрин, А. М. Якушев. — М. : ИКЦ «Академкнига», 2005. — 768 с.

88. Электрометаллургия стали и ферросплавов / Д. Я. Поволоцкий, В. Е. Рощин, М. А. Рысс [и др.] — М. : Металлургия, 1974. — 551 с.

89. Кудрин В. А. Теория и технология производства стали / В. А. Кудрин. — М. : Мир ; АСТ, 2003. — 528 с.

90. Лузгин В. И. Инновационные технологии индукционной плавки сплавов в литейном производстве / В. И. Лузгин, А. С. Коптяков, В. Э. Фризен // Литейщик России. — 2018. — № 4. — С. 29–33.

91. Конькова Т. Е. О путях повышения эксплуатационной надежности стальных литых деталей тележек грузовых вагонов / Т. Е. Конькова // Вестник ВНИИЖТ. — 2009. — № 1. — С. 22–26.

92. ПО «Уралвагонзавод» — лидер по производству высококачественных литых деталей в вагоностроении / А. А. Филиппенков, В. Н. Байков, М. А. Крупин [и др.] // Литейщик России. — 2007. — № 3. — С. 43–45.

93. Модифицирование мартеновской стали 20ГЛ для отливок вагонных деталей барий-кальций-стронциевым карбонатом / М. А. Крупин, А. А. Филиппенков, С. И. Попов [и др.] // Тр. восьмого съезда литейщиков России. — Ростов на/Д, 2007. — Т. 1. — С. 119–127.

94. Эффективность применения ванадийсодержащих сталей 30ХГФРЛ и 20ХГСФЛ взамен сталей с никелем и молибденом для литых деталей ответственного назначения / А. А. Филлипенков, Г. Н. Плотников, Л. А. Троп [и др.] // Тр. девятого съезда литейщиков России. — Уфа. — 20–24 апреля 2009. — С. 73–77.

95. Перспективы повышения технологических и служебных свойств литых вагонных деталей в условиях массового производства / С. И. Попов, А. А. Филлипенков, Л. А. Троп [и др.] // Тр. девятого съезда литейщиков России. — Уфа. — 20–24 апреля 2009. — С. 77–84.

96. Повышение технологических и служебных свойств низколегированной стали для литых деталей вагонов / А. А. Филлипенков, С. И. Кощеев [и др.] // Тр. десятого съезда литейщиков России. — Казань, 2011. — С. 47–51.

97. Производство чугунных отливок : учебник / В. Д. Белов, К. Н. Вдовин, В. М. Колокольцев [и др.] ; под ред. В. М. Колокольцева и Ри Хосена. — Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. Гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2011. — 521 с.

98. Современные сталеразливочные системы для литейных и машиностроительных производств / В. И. Золотухин, Е. И. Гордеев, Д. А. Провоторов [и др.] // Литейное производство сегодня и завтра : тр. междунар. науч.-практ. конф. / под ред. Г. А. Косникова. — СПб. : Культ-информ-пресс, 2016. — С. 160–168.

99. Type-2 fuzzy logic systems for temperature evaluation in ladle furnace / By M. Dorantes, P. Noradino; M. G. Maximiliano // IEEE Latin America Transactions. — 2016. — Vol. 14. — Iss. 8. — P. 3914–3920.

100. Attila G. C. Refining steel in an induction ladle furnfce. Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara / G. C. Attila. — 2015. — Aug. — Vol. 13. — Iss. 3. — P. 197–200.

101. Severstal plans upgrades to steel works, orders new ladle furnace / by Anonymous. Iron & Steel Technology. — 2016. — April. — Vol. 13. — Iss. 4. — P. 8.

102. Сталелитейный завод ООО «БВК» // Литейщик России. — 2017. — № 8. — С. 30–33.

103. Рожков А. И. К вопросу оценки технико-экономических показателей сталеплавильных печей постоянного и переменного тока / А. И. Рожков, А. И. Рожков // Литье и металлургия. — 2010. — № 1–2. — С. 46–49.

104. Martynova E. S. The project to control the thermal state of the electric arc furnace at the existing production / E. S. Martynova, V. Yu. Bazhin // International Conference on Advancing Knowledge from Multidisciplinary Perspectives in Science, Engineering & Technology: Conference Proceedings, February 25th, USA, 2019. — P. 66–70.

105. Singh A. Power Quality Issues of Electric Arc Furnace and their Mitigations-A / A. Singh, R. K. Singh, A. K. Singh. International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS). — Vol. 4. — Iss. 4. — Apr. 2017. — P. 22–41.

106. Бигеев В. А. Снижение ресурсоемкости сталеплавильного производства путем совершенствования процессов шлакообразования и утилизации шлаков : дис. … д-ра техн. наук / В. А. Бигеев. — Магнитогорск, 2001. — 361 с.

107. Обзор исследований по шлаковому режиму электропечей / И. В. Некрасов, О. Ю. Шешуков, А. А. Метелкин [и др.] // Сталь. — 2016. — № 6. — С. 28–35.

108. Kapilashrami A. Foaming of slags under dynamic conditions / A. Kapilashrami, M. Gornerup, A. Lahiri [et al.]// Metallurgical Transactions B. — 2006. — Vol. 37B. — P. 109–117.

109. Qi J. L. Study on the Lining Erosion of Deep Reduction Electric Arc Furnace in Smelting Metallized Pellets Process Produced by Vanadium Titanium Magnetite / J. L. Qi // Applied Mechanics and Materials. — 2012. — Vol. 217–219. — P. 445–448.

110. Qin J. Analysis on the Refractory Erosion of the Electric Arc Furnace and Study on the Measures of Protecting the Furnace Lining / J. Qin., J. L. Qi // Advanced Materials Research. — 2013. — Vol. 602–604. — P. 2082–2086.

111. Югов П. И. Петрографические исследования шлакообразования в кислородном конвертере / П. И. Югов, А. Г. Рыльникова, С. В. Лебедева // Сталь. — 1972. — № 6. — С. 502–505.

112. Технологическое воздействие многофункциональных композиционных материалов типа Синтиком® на процессы в сталеплавильной ванне / Г. А. Дорофеев, С. З. Афонин, П. И. Югов и [др.] // Тр. VIII конгр. сталеплавильщиков. — М. : ОАО «Черметинформация», 2005. С. 22–27.

113. Сущенко А. В. Анализ возможности использования известняка и извести с различной степенью обжига в конвертерном производстве / А. В. Сущенко, Д. И. Ленцов // Университетская наука — 2015 : в 4 т. Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (Мариуполь, 19–20 мая 2015 г.). ГВУЗ «ПГТУ». — Мариуполь, 2015. — Т. 1. — С. 167–169.

114. Kim H. S. Foaming behavior of CaO-Si0_2-FeO-MgO$_{!atd}$-X (X=Al_20_3, MnO, P_2O_s, and CaF_2) slags at high temperatures / H. S. Kim, D. J. Min, J. H. Park // ISIJ International. — 2001. — Vol. 41. — No. 4. — P. 317–324.

115. Khanna R. Novel sessile drop software for quantitative estimation of slag foaming in carbon slag interactions / R. Khanna, M. Rahman, Я. Leow,

V. Sahajwalla // Metallurgical and Materials Transactions B. — 2007. — Vol. 38B. — P. 719–723.

116. Ito K. Study on the foaming of CaO-$Si0_2$-FeO slags: Part I. Foaming parameters and experimental results / K. Ito, R. J. Fruehan // Metallurgical Transactions B. — 1989. — Vol. 20B. — P. 509–514.

117. Родзевич А. П. Физико-химические основы металлургических процессов: учеб. пособие / А. П. Родзевич // Юргинский технологический институт. — Томск : Изд-во Том. политех. ун-та, 2010. — 298 с.

118. Бигеев А. М. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали : учебник для вузов / А. М. Бигеев, В. А. Бигеев. — Магнитогорск : МГТУ, 2000. — 544 с.

119. Соколова Т. Г. Интенсификация шлакового режима в кислородно-конвертерном процессе / Т. Г. Соколова, В. П. Хайдуков, В. П. Трубников // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2006. — № 7. — С. 151–152.

120. Попель С. И. Теория металлургических процессов / С. И. Попель. — М. : Металлургия, 1986. — 468 с.

121. Борнацкий И. И. Физико-химические основы сталеплавильных процессов / И. И. Борнацкий. — М. : Металлургия, 1974. — 319 с.

122. Югов П. И. Механизм и кинетика оптимизированного шлакообразования в кислородном конверторе / П. И. Югов // Металлург. — № 8. — 2005. С. 43–49.

123. Kapilashrami A. Foaming of slags under dynamic conditions / A. Kapilashrami, M. Gornerup, A. Lahiri // Metallurgical Transactions B. — 2006. — Vol. 37B. — P. 109–117.

124. Теоретические и технологические особенности выплавки железоуглеродистого расправа в кислородных конвертерах и ДСП под магнезиальными шлаками / А. А. Бабенко, Л. А. Смирнов, Л. Ю. Михайлова [и др.] // Физическая химия и технология в металлургии : сб. тр., посвященный 60-летию ИМЕТ УрО РАН. Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук. — Челябинск : Южно-Уральское книжн. изд-во., 2015. — С. 234–250.

125. Технология выплавки стали в ДСП-135 ПАО «Северский трубный завод» под магнезиальными шлаками рационального состава / М. В. Ушаков, А. А. Бабенко, С. А. Спирин [и др.] // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР : сб. тр. науч.-практич. конф. с междунар. участием и элементами школ молодых ученых. — Екатеринбург : ООО «Медиа-холдинг «Уральский рабочий», 2015. — С. 191–195.

126. Кожухов А. А. Оценка коэффициента использования тепла электрических дуг при плавке под вспененным шлаком в современных ДСП / А. А. Кожухов // Электрометаллургия. — 2015. — № 6. — С. 3–9.

127. Kozhukhov A. A. Role of Prereduced Pellets in the Slag Foaming in Modern EAFs / A. A. Kozhukhov // Russian Metallurgy (Metally). — 2013. — No. 6. — P. 406–409.

128. Kozhukhov A. A. System for controlling the temperature regime of an arc steelmaking furnace operated with the continuous charging of metallized pellets and foaming of the furnace slag / A. A. Kozhukhov, A. S. Tkachev, I. V. Ryabinin // Metallurgist. — 2012. — Vol. 56. — No. 1–2. — P. 17–22.

129. Кожухов А. А. Исследование влияния химического состава шлака на его способность вспениваться в дуговой сталеплавильной печи / А. А. Кожухов // Электрометаллургия. — 2014. — № 12. — С. 18–23.

130. Kozhukhov A. A. Modeling gas-jet dust-cleaning above the blowing zone in an oxygen converter / A. A. Kozhukhov, E. E. Merker, A. A. Shevchenko // Metallurgist. — 2010. — Vol. 54. — No. 9–10. — P. 585–590.

131. Кожухов А. А. Развитие научных основ вспенивания сталеплавильных шлаков с целью повышения энерготехнологических показателей производства стали в дуговых сталеплавильных печах : автореф. дис. … д-ра. техн. наук / А. А. Кожухов. — М. : МИСиС, 2016. — 43 с.

132. Kozhukhov A. A. Study of the efficiency of using process dust in a layer of foamed slag in an oxygen converter / A. A. Kozhukhov // Metallurgist. — 2010. — Vol. 54. — No. 9–10. — P. 580–584.

133. Кожухов А. А. Об оценке эффективности вспенивания шлаков в дуговых сталеплавильных печах / А. А. Кожухов // Металлург. — 2018. — № 4. — С. 29–32.

134. Фомин А. М. Физико-химические особенности плавления МОК, исследование их фазового состава и разработка технологии производства стали в дуговой печи с целью повышения технико-экономических показателей плавки : дис. … канд. техн. наук / А. М. Фомин. — М., 1987. — 178 с.

135. Zhang Y. Effect of gas type and pressure on slag foaming / Y. Zhang, R. J. Fruehan // Metal. Trans. B. — 1995. — Vol. 26B. — P. 1086–1091.

136. Ogawa Yu. Physical model of slag foaming / Yu Ogawa, D. Fluin, FI. Gaye, N. Tokumitsu // ISIJ Int. — 1993. — Vol. 33 — No. 1. — P. 224–232.

137. Роготовский А. Н. Основы теории металлургических расплавов : учеб. пособие / А. Н. Роготовский, В. Г. Михайлов, А. А. Шипельников. — Липецк : ЛГТУ, 2014. — 129 с.

138. Шульте Ю. А. Электрометаллургия стального литья / Ю. А. Шульте. — М. : Металлургия, 1969. — 198 с.

139. Минеев Г. Г. Теория металлургических процессов : учебник / Г. Г. Минеев, Т. С. Минеева, И. А. Жучков ; под ред. Г. Г. Минеева. — Иркутск : Изд-во Иркутского гос. технич. ун-та, 2010. — 524 с.

140. Родзевич А. П. Физико-химические основы металлургических процессов (ФХОМП) : учеб. пособие / А. П. Родзевич. — Томск : ЮТИ ТПУ, 2010. — 298 с.

141. Кудрин В. А. Технологические процессы производства стали / В. А. Кудрин, В. А. Шишимиров. — Ростов н/Д : Феникс, 2017. — 302 с.

142. Производство стальных отливок : учебник для вузов / Л. Я. Козлов, В. М. Колокольцев, К.Н. Вдовин [и др.] ; под ред. Л. Я. Козлова. — М. : МИСиС, 2003. — 351 с.

143. Обзор результатов исследований, направленных на улучшение свойств отливок из высокомарганцевой стали / Е. В. Синицкий, А. А. Нефедьев, А. А. Ахметова [и др.] // Теория и технология металлургического производства. — 2016. — № 2(19). — С. 42–57.

144. Чернышев Е. А. Литейные сплавы и их зарубежные аналоги: справочник / Е.А. Чернышев. — М. : Машиностроение, 2006. — 336 с.

145. Износ отливок из высокомарганцовистой стали / К. Н. Вдовин, Н. А. Феоктистов, Д. А. Горленко, Н. В. Копцева // Черные металлы. — 2018. — № 9. — С. 48–53.

146. Zhao Ke-wen. Nonmetallic inclusion control of 350 km/h high speed rail steel / Zhao Ke-wen, Zeng Jian-hua // J. of Iron and Steel Research, International. — 2009. — Vol. 16. — No. 3. — P. 20–26.

147. Крючков О. В. Влияние внепечной обработки и модифицирования на пластичность и вязкость конструкционной стали / О. В. Крючков, В. Г. Горелов, В. В. Ласенко // Металлургия машиностроения. — 2007. — № 1. — С. 27–29.

148. Зинченко В. Г. Внепечная обработка валковой стали комплексными модификаторами / В. Г. Зинченко, И. В. Судоргин // Современные проблемы электрометаллургии стали. — Челябинск : Издательство ЮУрГУ, 2004. — С. 127–128.

149. Разработка рекомендаций по освоению производства в ОАО «Северский трубный завод» стальных труб повышенной стойкости против локальной коррозии /А. И. Зайцев, И. Г. Родионова, О. Н. Бакланова [и др.] // Коррозионно-активные неметаллические включения в углеродистых и низколегированных сталях. — М. : Металлургиздат, 2005. — С. 67–81.

150. Поведение азота в кислой индукционной печи / Л. Г. Шуб, В. В. Макаров, О. П. Лялин [и др.] // Металлургия машиностроения. — № 5. — 2003. — С. 5–6.

151. Голубцов В. А. Микрокристаллические комплексные модификаторы в производстве стали / В. А. Голубцов, И. В. Рябчиков, Р. Г. Усманов. — Челябинск : Изд. центр ЮУрГУ, 2017. — 137 с.

152. Рябчиков И. В. О качественных характеристиках модификаторов / И. В. Рябчиков, А. Г. Панов, А. Э. Корниенко // Сталь. — 2007. — № 6. — С. 18–22.

153. Григорович К. В. Влияние технологии раскисления трубных сталей на состав и количество неметаллических включений / К. В. Григорович, Т. В. Шибаева, А. М. Арсенкин // Металлы. — 2011. — № 5. — С. 164–170.

154. Рябчиков И. В. История развития производства модификаторов и основные требования к ним / И. В. Рябчиков // Модифицирование как эффективный метод повышения качества чугунов и сталей: Литейный консилиум. — Челябинск. — № 1. — 5–8 декабря 2005. — С. 4–7.

155. Шуб Л. Г. О целесообразности модифицирования стального литья / Л. Г. Шуб, А. Ю. Ахмадеев // Модифицирование как эффективный метод повышения качества чугунов и сталей: Литейный консилиум. — Челябинск. — № 1. — 5–8 декабря 2005. — С. 15–19.

156. Голубцов В. А. Теория и практика введения добавок в сталь вне печи / В. А. Голубцов. — Челябинск, 2006. — 423 с.

157. Голубцов В. А. Модифицирование — эффективный метод улучшения качества стали / В. А. Голубцов // Модифицирование как эффективный метод повышения качества чугунов и сталей: Литейный консилиум. — Челябинск. — № 1. — 5–8 декабря 2005. — С. 19–22.

158. Зорин Ф. И. Производство борсодержащих марок стали с регламентированным содержанием серы в условиях ЧМК / Ф. И. Зорин, А. Л. Подкорытов, В. Б. Захаров, С. Н. Ковалева // Металлург. — 2005. — № 1. — С. 34–35.

159. Жуков А. А. Некоторые особенности позднего модифицирования стали / А. А. Жуков, Г. И. Сильман // Металлы. Изв. АН СССР. — 1984. — № 4. — С. 11–121.

160. Кац Я. Л. Внепечное рафинирование и микролегирование стали — реальный путь повышения эффективности сталеплавильного производства / Я. Л. Кац, А. Ф. Каблуковский, С. И. Ябуров // И. П. Бардин и металлургическая наука. — М. : Металлургия, 2003. — С. 70–87.

161. Синельников В. А. Проблемы сталеплавильного производства на современном этапе / В. А. Синельников // Проблемы черной металлургии и материаловедения. — 2014. — № 1. — С. 43.

162. Давыдов С. В. Рынок модификаторов — хаос или развитие? / С. В. Давыдов, А. Г. Панов, А. Э. Корниенко // Металлургия машиностроения. — 2006. — № 3. — С. 8–9.

163. Худокормов Д. Н. Производство отливок из чугуна / Д. Н. Худокормов. — Минск : Вышэйшая школа, 1987. — 197 с.

164. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках / Н. Г. Гиршович. — Л. : Машиностроение, 1996. — 562 с.

165. Худокормов Д. Н. Еще раз о модифицирующем действии кремния на чугун / Д. Н. Худокормов, Д. А. Худокормов // Литье и металлургия. — 2007. — № 1. — С. 104–105.

166. Чугун : справочник / Под ред. А. Д. Шермана, А. А. Жукова. — М. : Металлургия, 1991. — 576 с.

167. Гаврилин И. В. Формирование структуры чугуна при плавлении и кристаллизации / И. В. Гаврилин // Литейное производство. — 1998. — № 6. — С. 6–8.

168. Смесевые модификаторы для чугунов / Н. И. Кобелев, А. В. Козлов, С. С. Зуйков [и др.] // Литейное производство. — 1989. — № 12. — С. 6–8.

169. Смесевые модификаторы для чугунов / Н. И. Кобелев, А. В. Козлов, С. С. Зуйков [и др.] // Э. И. ВНИИТЭМР. — 1968. — Вып. 12. — С. 7–12.

170. Леках С. Н. Внепечная обработка высококачественных чугунов в машиностроении / С. Н. Леках, Н. И. Бестужев. — Минск : Навука и тэхніка, 1992. — 269 с.

171. Ковалевич Е. В. Теоретические основы управления процессом модифицирования при получении чугуна с шаровидным графитом / Е. В. Ковалевич // Литейщик России. — 2002. — № 7/8. — С. 15–18.

172. Ковалевич Е. В. Теоретические основы выбора модификатора для получения чугуна с шаровидным графитом без пироэффектов / Е. В. Ковалевич // Литейщик России. — 2008. — № 8. — С. 29–31.

173. Вольнов И. Н. Системы автоматизированного моделирования литейных процессов — состояние, проблемы, перспективы / И. Н. Вольнов // Литейщик России. — 2007. — № 6. — С. 14–17.

174. Ильин В. П. Методы конечных разностей и конечных объемов для эллиптических уравнений / В. П. Ильин. — Новосибирск : Ин-т математики, 2000. — 345 с.

175. Вольнов И. Н. Моделирование литейных процессов — современные вычислительные технологии / И. Н. Вольнов // Литейщик России. — 2007. — № 11. — С. 27–30.

176. Hirt C. W. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries / C. W. Hirt, B. D. Nichols // J. Comp. Phys. — 1981. — № 39. — P. 201–225.

177. Салин В. Н. Практикум по курсу «Статистика» (в системе STATISTICA) / В. Н. Салин, Э. Ю. Чурилова. — М. : Издательский дом ; Социальные отношения ; Перспектива, 2003. — 188 с.

178. Сидняев Н. И. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для бакалавров / Н. И. Сидняев. — М. : Юрайт, 2015. — 219 с.

179. ГОСТ 977-88. Отливки стальные. Общие технические условия. — М. : ИПК Изд. стандартов, 2009. — 34 с.

180. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. — М. : ИПК Изд. стандартов, 2002. — 9 с.

181. ГОСТ 29234.3-91. Пески формовочные. Метод определения среднего размера зерна и коэффициента однородности. — М. : ИПК Изд. стандартов, 2008. — 5 с.

182. Васильев В. А. Физико-химические основы литейного производства / В. А. Васильев. — М. : Интермет инжиниринг, 2001. — 336 с.

183. Фуллерены и перспективы их использования в литейном и металлургическом производствах / П. А. Витязь, Н. А. Свидунович, Д. В. Куис [и др.] // Литейщик России. — 2022. — № 1. — С. 38–43.

184. Шумихин В. С. Синтетический чугун / В. С. Шумихин, П. П. Лузан, М. В. Желнис. — Киев : Наукова думка, 1971. — 157 с.

185. Панов А. Г. К вопросу о выборе науглероживателя при производстве синтетических чугунов / А. Г. Панов, Т. В. Рогожина // Теория и практика металлургических процессов при производстве отливок из черных сплавов. — Челябинск, 2007. — С. 56–61.

186. Баранов В. Н. Активация графита различного кристаллохимического строения для огнеупорных изделий и красок в литейном производстве : дис. … канд. техн. наук / Баранов В. Н. — Красноярск, 2005. — 131 с.

187. Гильманшина Т. Р. Влияние времени активации на параметры структуры графита / Т. Р. Гильманшина, В. Н. Баранов, Л. И Мамина // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. — 2014. — № 3. — С. 21–25.

188. Гильманшина Т. Р. Способы активации графита для очистки его от серы и ее соединений / Т. Р. Гильманшина, Л. И. Мамина, Г. А. Королева // Металлургия машиностроения. —2013. — № 5. С. — 18–21.

189. ГОСТ Р 56973-2016. Гафитизированные электроды для электродуговых печей. Эксплуатация. М. : Стандартинформ, 2016. — 18 с.

190. ГОСТ 2169-69. Кремний технический. Технические условия. — М. : ИПК Изд. стандартов, 1969. — 5 с.

191. Иванова В. С. От наноматериалов — к интеллектуальным нанотехнологиям / В. С. Иванова, Г. Э. Фолманис // Металлургия машиностроения. — 2007. — № 1. — С. 2–10.

192. Колтышев В. И. Исследования и разработка способов использования дисперсных отходов кремния для получения литейных силуминов: дис. … канд. техн. наук / В. И. Колтышев. — Владимир, 2002. — 144 с.

193. Гельфман М. И. Коллоидная химия / М. И. Гельфман, О. В. Ковалевич, В. П. Юстратов. — Спб. : Лань, 2003. — 332 с.

194. Патент РФ № 2364649. Модифицирующая смесь с рафинирующим эффектом / А. В. Чайкин, В. А. Чайкин, В. М Колокольцев // Бюл. № 23. — Опубл. 20.08.2009.

195. Иванова В. С. К итогам симпозиума «Фракталы и прикладная синергетика» / В. С. Иванова, В. У. Новиков // Литье и металлургия. — 2004. — № 1. — С. 33–37.

196. Krushenko G. G. Nanomodification of a Metal during Casting and Welding / G. G. Krushenko // Russian Metallurgy (Metally). — Dec. 2018. — Vol. 2018. — Iss. 13. — P. 1229–1233.

197. Закирничная М. М. Образование фуллеренов в углеродистых сталях и чугунах при кристаллизации и термических воздействиях : дис. … д-ра техн. наук / М. М. Закирничная. — Уфа, 2001. — 244 с.

198. Гаврилин И. В. Кластеры — фуллерены — фракталы в жидких литейных сплавах / И. В. Гаврилин // Металлургия машиностроения. — 2004. — № 5. — С. 30–33.

199. Давыдов С. В. Технология наномодифицирования доменных и ваграночных чугунов / С. В. Давыдов // Заготовительное производство. — 2005. — № 2. — С. 3–9.

200. Чайкин В. А. Рафинирование сталей и чугунов дисперсными модификаторами при выплавке в дуговых и индукционных электропечах / В. А. Чайкин, А. В. Чайкин, В. А. Журавлев // Тр. двенадцатого съезда литейщиков России. — Н. Новгород, 2015 — С. 155–159.

201. Чайкин А. В. Повышение эффективности диффузионного раскисления при выплавке стали в кислых и основных дуговых электропечах / А. В. Чайкин, В. А. Чайкин, Н. А. Феоктистов // Литейщик России. — № 8. — 2012. — С. 40–42.

202. Чайкин А. В. Новый материал для диффузионного раскисления в агрегате комплексной обработки сталей / А. В. Чайкин, В. А. Чайкин, А. Д. Касимгазинов, П. О. Быков // Черные металлы. — № 9. — 2018. — С. 6–11.

203. Заявка на изобретение № 2025110597 МПК C21C 5/52. Способ диффузионного раскисления стали. Заявлено 24.05. 2025 / А. В. Чайкин.

204. Никифорова Э. М. Физикохимия керамических, композиционных и наноматериалов : учеб. пособие / Э. М. Никифорова, Р. Г. Еромасов, А. Ф. Шиманский. — Красноярск : СФУ, 2016. — 156 с.

205. Модификатор барий-стронциевый БСК-2. Технические условия ТУ1717-001-75073896-2005. — Иркутск, 2005. — 4 с.

206. Курдюмов А. В. Производство отливок из сплавов цветных металлов: учебник / А. В. Курдюмов, В. Д. Белов, М. В. Пикунов ; под общ. ред. В. Д. Белова. — М. : МИСИС, 2011. — 615 с.

207. Коршунов Б. Г. Диаграммы плавкости хлоридных систем / Б. Г. Коршунов — Л. : Химия, 1972. — 84 с.

208. Grandfield J. Directchil casting of light alloys science and technology — Published by John Wiley & Sons, Inc. / J. Grandfield, D. G. Eskin, I. F. Bainbridge. — Hoboken, New Jersey, 2013. — 412 p.

209. Степанов А. Т. Теория и технология выплавки стали в конвертерах. Курс лекций : учеб. пособие / А. Т. Степанов. — М. : Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. — 156 с.

210. Чайкин А. В. Применение дисперсных раскислительных смесей для повышения качества стали 20ГФЛ / А. В. Чайкин, В. А. Чайкин, В. В. Колпаков, Д. В. Маслов, Е. П. Закоптелов // Металлургия машиностроения. — № 5. — 2018. — С. 10–13.

211. Рожков А. И. К вопросу оценки технико-экономических показателей сталеплавильных печей постоянного и переменного тока / А. И. Рожков, А. И. Рожков // Литье и металлургия. —2010. — № 1–2. — С. 46–49.

212. Сравнительные показатели дуговых сталеплавильных печей постоянного и переменного тока для литейных производств / К. А. Елизаров, М. М. Крутянский, С. М. Нехамин, А. И. Черняк // Электрометаллургия. — 2011. — № 1. — С. 9–15.

213. Singh A. Power Quality Issues of Electric Arc Furnace and their Mitigations-A / A. Singh, R. K. Singh, A. K. Singh // International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS). — Vol. 4. — Iss. 4. — Apr. 2017. — P. 22–41.

214. Шимко М. Б. Исследование процессов теплообмена и разработка рекомендаций по его совершенствованию в одночетырехэлектродных дуговых сталеплавильных печах постоянного тока : автореф. дис. … канд. техн. наук / М. Б. Шимко. — М. : МИСиС, 2005. — 20 с.

215. Технический аудит дуговых печей на ВКМ-Сталь. ООО «НПФ КОМТЕРМ» // comterm.ru : [сайт]. — Апрель, 2018. — URL: https://comterm.ru/news_ru/ index.php?ELEMENT_ID=2992 (дата обращения: 28.03.2020).

216. В Мордовии запущена новая сталеплавильная печь // ГТРК «Мордовия» : [сайт]. — Февраль, 2020. — URL: https://mordoviatv.ru/v-mordovii-zapushhena-novaya-staleplavilnaya-pech/ (дата обращения: 28.03. 2020).

217. Марков В. Ф. Колоидная химия: примеры и задачи : учеб. пособие / В. Ф. Марков, Т. А. Алексеева, Л. А. Брусницина, Л. Н. Мускаева. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 188 с.

218. Чайкин В. А. Рафинирование и модифицирование стали 20ГЛ кальций-стронциевым карбонатом / А. В. Чайкин, В. П. Кузнецов, П. В. Салтыков // Тр. девятого съезда литейщиков России. — Уфа, 20–24 апреля 2009. — С. 81–83.

219. Шаповалов А. Н. Теория металлургических процессов : учебно-методическое пособие. / А. Н. Шаповалов. — Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2015. — 91 с.

220. Патент RU 2641804C1. Модифицирующая смесь для чугуна / А. В. Чайкин. — Зарегистрирован в государственном реестре 17.06.2025.

221. Еднерал Ф. И. Электрометаллургия стали и ферросплавов / Ф. И. Еднерал. — М. : Металлургия, 1977. — 488 с.

222. Слетова Н. В. Создание препаратов для рафинирования и модифицирования Al-сплавов, обеспечивающих стабильные показатели качества отливок: дис. канд. техн. наук / Н. В. Слетова. — Минск, 2014. — 185 с.

223. Флюсы : справочник / В. Л. Гусовский, А. Е. Лифшиц, М. Г. Ладыгичев. — М. : Теплотехник, 2008. — 258 с.

224. Вдовин К. Н. Флюсы для электрошлакового переплава конструкционных сталей / К. Н. Вдовин, Н. А. Феоктистов, К. Г. Пивоварова, Д. А. Дерябин // Электрометаллургия. — 2017. — № 4. — С. 13–19.

225. Лебедев И. В. Повышение ассимилирующей способности шлакового расплава в промежуточном ковше при непрерывной разливке стали низкоуглеродистых сталей, раскисленных алюминием : автореф. дис. … канд. техн. наук / И. В. Лебедев. — М., 2014. — 25 с.

226. Семенов В. И. Образование аустенитной и графитной фаз под воздействием порошкового Si + C модификатора при затвердевании серого чугуна / В. И. Семенов, А. В. Чайкин // Заготовительные производства в машиностроении. — 2009. — № 8. — С. 11–20.

227. Семенов В. И. Затвердевание литейных сплавов. Походы, концепция самоорганизации, принципы и механизмы : ч. 1 / В. И. Семенов ; под ред. С. Б. Масленкова. — М. : Спутник, 2014. — 218 с.

228. Давыдов С. В. Развитие диаграммы состояния сплавов системы Fe — C : монография / С. В. Давыдов. — Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2025. — 680 с.

229. Адамова Л. В. Процессы на поверхности раздела фаз : учеб. пособие для студентов, обучающихся по направлениям 010700 «Физика», 020100 «Химия», 220600 «Инноватика», 210600 «Нанотехнология» и специальностям 010701 «Физика», 020101 «Химия» / Л. В. Адамова. — Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2008. — 127 с.

230. Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди. — М. : Мир, 2002. — 464 с.

231. Ivanova V. S. Synergetic analysis of synthesis of structures of nanosystems THE COMPLEX SYSTEMS SLOZHNYE SISTEMY / V. S. Ivanova // Interdisciplinary Scientific Journal. — Oct. — Dec. — No. 4(9). — 2013. — P. 4–32.

232. Хакен Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / Г. Хакен. — М. : Мир, 1985 — 423 с.

233. Глызин С. Д. Диффузионный хаос и его инвариантные числовые характеристики / С. Д. Глызин, А. Ю. Колесов, Н. Х. Розов / Теоретическая и математическая физика. — 2020. — Т. 203. — № 1. — С. 10–25.

234. Zhengning Li. Outstanding Synergy of Superior Strength and Ductility in Heterogeneous Structural 1045 Carbon Steel / Li Zhengning, La. Peiqing, J. Sheng [et al.] // Metals and Materials International. — 2021. — Vol. 27. — P. 2562–2574.

235. Davydov S. V. Spinodal Decomposition of Tungsten-Containig Phases in Functional Coating Obtained via High-Enerdgy Implantation Processes / S. V. Davydov, E. V. Petrov // Technical Physics. — 2017. — Vol. 62. — No. 8. — P. 1207–1213.

236. Чайкин А. В. Теория и практика модифицирования ответственных железнодорожных отливок из серого чугуна высоких марок / А. В. Чайкин // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. — 2024. — Т. 80. — № 5. — С. 37–44.

237. Кульбовский И. К. Влияние термовременной обработки и шихтовых материалов на природу центров кристаллизации графита в расплаве чугуна / И. К. Кульбовский, А. Н. Поддубный и др. // Литейщик России. — 2008. — № 8. — С. 33–35.

238. Феоктистов Н. А. Совершенствование технологии производства крупнотоннажных стальных отливок: дис. канд. техн. наук / Н. А. Феоктистов. — Магнитогорск, 2013. — 137 с.

239. Колпаков В. В. Совершенствование выплавки стали 110Г13Л методом переплава / В. В. Колпаков, А. В. Чайкин, В. А. Чайкин, К. Н. Вдовин // Заготовительные производства в машиностроении. — 2019. — № 4. — С. 147–154.

240. Патент RU2838609C1. Шлакообразующая смесь / А. В. Чайкин. — Опубл. 21.04.2025.

241. Сравнительный анализ качественных показателей стали 110Г13Л, выплавленных с применением различных модификаторов и раскислительных смесей / А. В. Чайкин, В. А. Чайкин, В. С. Лозов [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. — 2018. — Т. 16. — № 1. — С. 19–25.

242. Совершенствование технологий высокого уровня применением дисперсных раскислительных смесей в агрегате ковш печь (АКП) / А. В. Чайкин, В. Л. Савицкий, В. В. Колпаков [и др.] // Литейщик России. — 2019. — № 9. — С. 11–18.

243. Патент на изобретение № 2819765. Способ выплавки высокомарганцовистой стали методом переплава / А. В. Чайкин, В. А. Чайкин. — Зарегистрирован в государственном реестре 23 мая 1924 года. — 12 с.

244. Чайкин В. А. Повышение эффективности диффузионного раскисления при выплавке стали в кислых и основных дуговых электропечах / В. А. Чайкин, А. В. Чайкин, Н. А. Феоктистов // Литейщик России. — № 8. — 2012. — С. 40–42.

245. Чайкин А. В. Инновации при выплавке стали в кислых печах / А. В. Чайкин, В. В. Колпаков, В. А. Чайкин, К. Н. Вдовин // Заготовительные производства в машиностроении. — 2019. — Т. 17 — № 10. — С. 435–441.

246. Патент № 2833976 РФ. Способ выплавки сталей в печах с кислой футеровкой / Чайкин А. В. // Бюл. № 4. — Опубл. 03.02.2015.

247. Чайкин А. В. Повышение механических свойств стали 20ГЛ, выплавленной в кислых печах, ковшевой обработкой РСУ / А. В. Чайкин, В. Н. Шевченко // Прогрессивные литейные технологии : тр. конф. / Под ред. проф. В. Д. Белова и доц. А. В. Колтыгина. — М. : МИСиС, 2024. — С. 111–121.

248. Чайкин А. В. Влияние внепечной обработки рафинирующей смесью универсальной (РСУ) на механические свойства отливок автосцепки из стали 20ГЛ, выплавленных в печах с кислой футеровкой / А. В. Чайкин, В. А. Чайкин, В. Н. Шевченко // Литейное производство и металлургия — 2024. Беларусь» : тр. конф. — Минск : БНТУ, 2024. — С. 41–45.

249. ОСТ 9179-2018. Известь строительная. Технические условия. — ФГУП «Стандартинформ». — 2018. — 8 с.

250. ГОСТ 29219-2023. Концентраты плавиковошпатовые (флюоритовые), применяемые в кислотной и керамической промышленности. Технические условия. М. : ФГБУ «Институт стандартизации». — 2023. — 6 с.

251. ГОСТ 5100-85. Сода кальцинированная. Технические условия. М. : ФГУП «Стандартинформ», 2002. — 26 с.

252. Разработка технологии выплавки, внепечной обработки и разливки заданной марки стали : учеб. пособие. — М. : МИСиС, 1998. — 117 с.

253. Повышение степени десульфурации конвертерной стали путем обработки в ковше твердошлаковыми смесями / О. К. Токовой, Д. Я. Поволоцкий и [др.]. — Сталь № 6. — 1996. — С. 27–30.

254. Войнов А. Р. Технология комплексной обработки сталей на агрегате «ковш-печь» (ladle-furnace) : учеб. пособие / А. Р. Войнов, Э. Х. Ри ; науч. ред. Э. Х. Ри. — Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2018. — 64 с.

255. ГОСТ 2253-76. Аппараты поглощающие пружинно-фракционные для подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Технические условия. — М. : ФГУП «Стандартинформ», 1986. — 7 с.

256. Кислинг Р., Неметаллические включения в стали / Р. Кислинг, Н. М. Ланге. — Металлургия, 1968. — 124 с.

257. Lis T. Modification of oxygen and sulphur inclusions in steel / T. Lis // Metallurgija. — 2009. — Vol. 48. — № 2. — С. 95–98.

258. Чайкин А. В. Моделирование процесса удаления неметаллических включений из расплава флотацией с помощью программного комплекса FLOW 3D / А. В. Чайкин, И. Н. Вольнов, В. А. Чайкин, К. Н. Вдовин // Литейное производство. — 2020. — № 5. — С. 38–40.

259. Бархударов М. Моделирование литейных процессов с изменяемой геометрией / М. Бархударов, Г. Вей // Литейщик России. — 2007. — № 12. — С. 10–15.

260. Hirt C. W. and Nichols B. D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries / C. W. Hirt, B. D Nichols // J. Computational Physics. — 1981. — 39. — P. 201–225.

261. Вольнов И. Н. Моделирование процессов получения монодисперсных капель жидкостей в электрокаплеструйных технологиях / И. Н. Вольнов, В. С. Нагорный // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. — 2010. — № 4. — С. 294–300.

262. Исследование процесса позднего модифицирования с использованием моделирования / В. А. Чайкин, А. В. Чайкин, И. Н. Вольнов

[и др.] // Заготовительное производство в машиностроении. — 2011. — № 10. — С. 8–12.

263. Чайкин А. В. Технология модифицирования отливок из серого чугуна высоких марок с применением смесевых дисперсных модификаторов : монография / А. В. Чайкин, В. А. Чайкин. — М. : Изд-во МГОУ, 2012. — 140 с.

264. Великанов А. В. Разработка и совершенствование нормативных документов на производство деталей узла гашения колебаний тележек грузовых вагонов / А. В. Великанов, Б. В. Борщ, А. В. Габец, С. М. Пашарин // Вестник ВНИИЖТ. — 2012. — № 2. — С. 31–34.

265. Габец А. В. Специальный модифицированный легированный чугун для фрикционного клина вагонных тележек / А. В. Габец, А. В. Сухов, Г. А. Филиппов // Литейное производство. — 2014. — № 4. — С. 2–4.

266. Габец А. В. Совершенствование фрикционного клина узла гашения колебаний тележки грузового вагона / А. В. Габец, А. В. Сухов, М. В. Сапетов, Г. А. Филиппов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. — 2014. — № 1. — С. 91–97.

267. Габец А. В. Специальный чугун для отливки фрикционного клина тележки железнодорожного вагона // А. В. Габец / Ползуновский вестник. — 2013. — № 4/2. — С. 51–52.

268. Болдырев Д. А. Оптимизация изготовления отливки «клин фрикционный» из чугуна СЧ35 / Д. А. Болдырев // Литейное производство. — № 3. — 2025. — С. 11–14.

269. Чайкин А. В. Теория и практика модифицирования ответственных железнодорожных отливок из серого чугуна высоких марок / А. В. Чайкин // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. — 2024. — Т. 80. — № 5. — С. 37–44.

270. ТУ 3183-163-01124323-2003. Клин фрикционный из высокопрочного чугуна для тележек грузовых вагонов. Технические условия. — М. : ФГУП «Стандартинформ», 2019.

271. Panov A. G. About the Possibility of Increase in CGI Properties by Austempering / A. G. Panov, D. A. Gurtovoy, I. F. Shaekhova // Solid State Phenomena. — Vol. 284. — 2018. — P. 224–228.

272. Корниенко Э. Н. Перспективы производства отливок из ЧШГ аустенитно-бейнитного класса / Э. Н. Корниенко, А. Г. Панов, Д. Ф. Хальфин // Литейщик России. — 2004. — № 6. — С. 11–16.

273. Крутилин А. Н. Влияние термической обработки на структуру и свойства экономно легированного высокопрочного чугуна / А. Н. Крутилин // Литье и металлургия. — 2008. — № 1 (45). — С. 102–108.

274. Макаренко К. В. Бейнитная закалка чугуна из литого состояния / К. В. Макаренко // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2007. — № 7. — С. 29–32.

275. Власов В. И. Литая высомарганцовистая сталь / В. И. Власов, Е. Ф. Комолова. — М. : Машгиз, 1987. — 195 с.

276. Attila G. C. Refining steel in an induction ladle furnfce / G. C. Attila // Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara. — 2015. — Aug. — Vol. 13. — Iss. 3. — P. 197–200.

277. Putan V. Influence of the addition of a reducing mixture slag and duration of treatment on the desulphurization and deoxidation efficiency / V. Putan, A. Putan, E. Ardelean // Solid State Phenomena. — 2016. — Vol. 254. — P. 144–148.

278. ГОСТ 7565-81 (ИСО 377-2-89) Чугун, сталь и сплавы. Метод отбора проб для определения химического состава. — М. : ФГУП «Стандартинформ», 2009. — 13 с.

279. Чайкин А. В. / Моделирование удаления неметаллических включений из расплава флотацией во FLOW-D // А. В. Чайкин, И. Н. Вольнов, В. А. Чайкин // Литейное производство сегодня и завтра : тр. 13-й Междунар. научн.-практ. конф. — СПб. — 2020. — С. 236–242.

280. Чайкин А. В. Моделирование процесса рафинирования стали 20ГЛ в программном комплексе FLOW — 3D / А. В. Чайкин, Е. Е. Петров, И. Н. Вольнов, В. А. Чайкин // Прогрессивные литейные технологии : тр. X междунар. науч. — практ. конф. — НИТУ «МИСиС». — 9–3 ноября 2020 г. — С. 45–458.

281. Чайкин А. В. Инновации в проектировании и производстве тележек грузовых вагонов и отливок для них / А. В. Чайкин, В. А. Чайкин, В. В Колпаков, К. Н. Вдовин // Заготовительные процессы в машиностроении. — Т. 17. — 2019. — № 7. — С. 291–295.

282. Чайкин А. В. Внедрение инноваций при выплавке стали для ответственных отливок тележек грузовых вагонов в целях повышения их эксплуатационной надежности / А. В. Чайкин, В. А. Чайкин, В. В. Колпаков, К. Н. Вдовин // Черные металлы. — 2021. — № 9. — С. 9–13.

283. Чайкин А. В. Оптимизация групп стали 110Г13Л для отливок крестовины железнодорожные и стрелочные переводы в условиях Муромского стрелочного завода / А. В. Чайкин, В. А. Чайкин, О. Л. Бурдюжа, Н. В. Турусов // Литейное производство. — 2023. — № 10. — С. 14–19.

284. Chaikin A. V. Improvement of the quality group of critical railway castings from 110G13L steel / A. V. Chaikin, V. A Chaikin, P. O. Bykov, & A. B. Kuandykov // Engineering, Technology and Applied Science Research. (2025) Vol. 15. — No. 3. — June. —2025. — P. 23111–23116.

285. Чайкин А. В. Теоретические предпосылки к созданию смесевого комплексного модификатора для устранения отбела в ответственных отливках из серого чугуна / А. В. Чайкин, В. А. Чайкин // Литейное производство. — 2025. — № 3. — С. 3–9.

286. Чайкин А. В. Теория и практика модифицирования ответственных железнодорожных отливок из серого чугуна высоких марок / А. В. Чайкин // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. — 2024. — Т. 80. № 5. — С. 37–44.

287. Чайкин А. В. Опыт получения высокопрочного чугуна в условиях АО «Благовещенский арматурный завод» (АО «БАЗ») / А. В. Чайкин, Д. В. Пеплов, В. И. Лазечный // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. — 2025. — Т. 81. — № 8.

288. Совершенствование технологии производства ответственных железнодорожных отливок «клин фрикциона» из СЧ35 / А. В. Чайкин, Д. В. Пеплов, В. И. Лазечный // Литейное производство. —2025. — № 10. — С. 2–9.

289. Повышение литейных и механических свойств стали, выплавляемой в печи с кислой футеровкой / А. В. Чайкин, П. Н. Пицан, Д. В Маслов // Литейщик России. — 2025. — № 7. — С. 21–27.

290. Чайкин А. В. Повышение эксплуатационной надежности ответственной железнодорожной отливки «клин фрикциона» / А. В. Чайкин, В. А. Чайкин // Заготовительные производства в машиностроении. — 2025. — № 11. — С. 492–498.

Научное издание

Чайкин Андрей Владимирович
Чайкин Владимир Андреевич

Научно обоснованные технологические процессы модифицирования и рафинирования чугунов и сталей для отливок ответственного назначения с использованием дисперсных материалов

Монография

Корректор Я. А. Веретнова
Верстка Ю. Н. Сафонкина
Главный редактор В. М. Коровин

Издательство «Наукоемкие технологии»
ООО «Корпорация «Интел Групп»
https://publishing.intelgr.com
E-mail: publishing@intelgr.com
Тел.: +7 (812) 945-50-63
Интернет-магазин издательства
https://shop.intelgr.com/

Подписано в печать 27.04.2026.
Формат 60×84/16
Объем 15,5 п.л.
Тираж 500 экз.

ISBN 978-5-00271-105-5

