

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова»

На правах рукописи

Ушаков Сергей Николаевич



**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
ТРУБНОЙ УЛЬТРАНИЗКОСЕРНИСТОЙ СТАЛИ
В СОВРЕМЕННОМ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОМ ЦЕХЕ**

Специальность 05.16.02 – Metallургия
черных, цветных и редких металлов

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
Бигеев Вахит Абдрашитович

Магнитогорск – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 СТАЛЬ ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ.....	9
1.1 Востребованность труб для магистральных газопроводов.....	9
1.2 Требования к служебным свойствам и составу трубной стали.....	12
Выводы по первой главе.....	17
ГЛАВА 2 ДЕСУЛЬФУРАЦИЯ МЕТАЛЛА.....	18
2.1 Сера в стали и принципы десульфурации.....	18
2.2 Ковшечая десульфурация чугуна.....	32
2.3 Ковшечая десульфурация стали.....	41
2.3.1 Ковшечая обработка полупродукта в процессе выпуска из агрегата твердой шлакообразующей смесью.....	41
2.3.2 Обработка металла на агрегате «ковш-печь».....	43
2.3.2.1 Наведение «белого» шлака.....	43
2.3.2.2 Вдувание порошкообразных материалов.....	44
Выводы по второй главе.....	50
ГЛАВА 3 БАЗОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБНОЙ СТАЛИ В ККЦ.....	52
3.1 Ковшечая обработка чугуна.....	53
3.2 Выплавка стали в конвертере.....	61
3.3 Ковшечая обработка стали на АКП.....	63
3.4 Вакуумирование стали.....	72
3.5 Непрерывная разливка стали на МНЛЗ.....	74
3.6 Методики исследований.....	78
Выводы по третьей главе.....	82
ГЛАВА 4 ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА УЛЬТРАНИЗКОСЕРНИСТОЙ СТАЛИ МАРКИ DNV SAWL 485 FD.....	83

4.1 Десульфурация чугуна.....	83
4.2 Выплавка полупродукта для получения ультранизкосернистой стали.....	87
4.3 Обработка металла на агрегате «ковш-печь».....	89
4.4 Вакуумная обработка металла.....	99
4.5 Разливка стали на МНЛЗ.....	100
Выводы по четвертой главе.....	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	104
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	107
ПРИЛОЖЕНИЕ А – СПРАВКА ИЗ ПАО «ЧТПЗ».....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ В – КАЛЬКУЛЯЦИЯ СЕБЕСТОИМОСТИ 1 Т НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО СЛЯБА ИЗ СТАЛИ МАРКИ DNV SAWL 485 FD.....	124

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Для экспорта российского газа в страны Европы разработан проект прокладки газопровода «Северный поток–2». Часть двух ниток этого газопровода должна пройти по дну Балтийского моря. Специфика эксплуатации подводных газопроводных систем характеризуется сочетанием высокого внутреннего рабочего давления газа из-за отсутствия промежуточных компрессорных станций и сильного наружного гидростатического давления столба морской воды; агрессивностью морской среды, вызывающей повышенную внешнюю и внутреннюю коррозию. Для реализации этого проекта необходимы электросварные прямошовные трубы с внутренним диаметром 1153 мм и толщиной стенок до 35 мм, способные выдержать рабочее давление до 220 атм. Трубы имеют трехслойное наружное и внутреннее покрытие и изготавливаются из ультранизкосернистой стали марки DNV SAWL 485 FD. Заказ на производство толстого горячекатаного листа из такой стали был получен ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Лист должен кататься на стане «5000» из непрерывнолитых слябов, произведенных в кислородно-конвертерном цехе. Поэтому актуальной задачей явилась разработка в условиях кислородно-конвертерного цеха ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» технологии производства трубной стали с ультранизким – не более 0,0015 % содержанием серы.

Степень разработанности темы

Вопросами десульфурации стали в разные годы занимались многие отечественные и зарубежные ученые. Среди них следует отметить исследования Явойского В.И., Кудрина В.А., Поволоцкого Д.Я., Вишкарева А.Ф., Борнацкого И.И., Югова П.И., Лякишева Н.П., Шалимова А.Г., Казакова С.В., Дюдкина Д.А., Григоровича К.В., Семина А.Е., Шешукова О.Ю., Пармы В., Ямады К., Туркдогана Е., Плекингера Е., Лекера Т., Буссара П. и др.

Результаты этих исследований являются прочной основой для совершенствования оборудования и развития технологии ковшевой десульфурации стали.

Цель и задачи работы

Цель работы – получение непрерывнолитых слябов из трубной ультранизкосернистой стали марки DNV SAWL 485 FD для производства толстого горячекатаного листа магистрального газопровода «Северный поток–2».

Для достижения этой цели в условиях ПАО «ММК» потребовалось решить следующие задачи:

- изучить известные способы десульфурации чугуна и стали и собственные возможности;
- разработать технологию ковшевой десульфурации чугуна и оценить ее эффективность;
- исследовать особенности технологии выплавки полупродукта в конвертере для получения трубной ультранизкосернистой стали с ковшевой обработкой твердой шлакообразующей смесью;
- разработать технологию ковшевой десульфурации трубной ультранизкосернистой стали на агрегате «ковш-печь» с оценкой ее эффективности;
- изучить особенности вакуумной обработки и непрерывной разливки трубной ультранизкосернистой стали;
- оценить затраты на производство непрерывнолитых слябов из трубной ультранизкосернистой стали.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- установлена зависимость степени ковшевой десульфурации чугуна от отношения массы флюидизированной извести к массе магния; выявлена более высокая десульфурующая способность магния в смеси реагентов; достижение степени десульфурации 80 % возможно при отношении реагентов, равном 4,3;
- выявлена зависимость между степенью десульфурации металла и отношением массы кусковой извести к массе плавикового шпата на первой ста-

дии обработки стали на агрегате «ковш-печь»; для наиболее эффективного удаления серы рекомендуется иметь данное отношение в интервале 1,9...2,4;

– определена зависимость степени десульфурации металла от интенсивности вдувания флюидизированной извести в потоке аргона для второй стадии обработки стали на АКП; для интенсификации удаления серы рекомендуется вдувать флюидизированную известь с интенсивностью 14–15 кг/(м³·мин);

– установлена возрастающая зависимость коэффициента распределения серы от удельного расхода флюидизированной извести на АКП, согласно которой при рекомендованном расходе флюидизированной извести от 2,2 до 2,8 кг/т итоговый коэффициент распределения серы увеличивается с 220 до 275.

Практическая значимость работы заключается в том, согласно разработанной технологии в кислородно-конвертерном цехе ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» произведены непрерывнолитые слябы из трубной ультранизкосернистой стали марки DNV SAWL 485 FD с содержанием серы не более 0,0015 %. На стане «5000» произведен горячекатаный лист толщиной 30,9 и 34,6 мм для производства электросварных прямошовных труб по проекту «Северный поток-2». В ПАО «Челябинский трубопрокатный завод» отгружено 451673 т листа. Себестоимость непрерывнолитого сляба из стали марки DNV SAWL 485 FD равняется в среднем около 29 тыс. руб., что составляет примерно 72 % от стоимости горячекатаного листа.

Результаты исследований могут быть использованы в учебном процессе высших учебных заведений при изучении металлургических дисциплин.

Положения, выносимые на защиту:

- 1 Результаты исследования степени ковшевой десульфурации чугуна при вдувании в потоке азота флюидизированной извести и магнезия.
- 2 Результаты изучения эффективности десульфурации полупродукта в процессе его выпуска из конвертера в ковш твердой шлакообразующей смесью.

3 Результаты исследования ковшевой десульфурации стали на агрегате «ковш-печь» флюидизированной известью.

Методология и методы исследований

Текучесть флюидизированной извести определялась на специальной установке по длине образующегося «ручья» при истечении по желобу с использованием методики фирмы «Almamet GmbH» (Германия). Гранулометрический состав флюидизированной извести оценивался с использованием воздушоструйного ситового аппарата «Hosokawa Alpine e200 LS Basic». Химический состав извести анализировался энергодисперсионном рентгеновском спектрометре «SPECTROXEPOS».

Химический состав проб металла определялся по стандартным методикам с использованием эмиссионного спектрометра SPECTROLAB M8A и анализатора TC-436 фирмы «LECO» (США). Содержание растворенного в металле водорода измерялось по стандартной методике на анализаторе «Hydris Net» (Германия). Химический состав проб шлака определялся по стандартным методикам с использованием спектрометров рентгеновских многоканальных типа ARL 8680S XRF и ARL 8660S XRF, спектрометра рентгенофлуоресцентного ARL 9900 (все – фирмы «ARL», Швейцария).

В работе применялась статистическая обработка производственных данных с использованием корреляционно-регрессионного анализа.

Личный вклад автора состоит в формулировании цели и задач исследования, сборе и обработке производственных данных, анализе полученных результатов, систематизации и обосновании защищаемых положений, подготовке материалов для опубликования.

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности результатов обеспечивается представительным объемом исходных данных, корректностью применения статистического анализа данных на ЭВМ, получением по разработанной методике производ-

ства около 470 тыс. т непрерывнолитых слябов из трубной стали с содержанием серы не более 0,0015 %.

Основные положения работы доложены и обсуждены на XV международном Конгрессе сталеплавателей и производителей металла (Тула, октябрь 2018 г.), международной научной конференции, посвященной 115-летию со дня рождения академика А.М. Самарина «Физико-химические основы металлургических процессов» (Москва, ИМЕТ РАН, ноябрь 2017 г.), международной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали» (Челябинск, ЮУрГУ, 2019 г.).

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 11 научных трудах, в том числе – в 4 рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, в 2 статьях – в журналах, индексируемых в международной наукометрической базе Scopus, в одной монографии и 4 статьях в других изданиях.

ГЛАВА 1 СТАЛЬ ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

1.1 Востребованность труб для магистральных газопроводов

Российская Федерация занимает второе место в мире по разведанным запасам и первое – по добыче природного газа. Этот вид топлива играет огромную роль в энергетическом балансе нашей и других стран. В России самая протяженная в мире сеть внутренних и трансконтинентальных газопроводов [1–6].

ПАО «Газпром» ежегодно транспортирует более 550 млрд. м³ газа, в том числе около 24 % (отн.) – на экспорт [7–13]. По магистральным трубопроводам перемещается более 90 % добываемого газа, 80 % нефти и более 20 % продуктов нефтепереработки. Протяженность магистральных трубопроводов составляет более 170 тыс. километров. Большая часть из них выполнена из труб большого диаметра до 1420 мм, выдерживающих рабочее давление до 11,8 МПа [14–18].

У многих газопроводов приближается срок окончания эксплуатации труб. Для обеспечения их безопасной эксплуатации, расширения сети трубопроводов в экстремальных северных широтах необходимы новые требования к трубам большого диаметра. Прямошовные трубы диаметром до 1420 мм, длиной – до 18 м, с толщиной стенки – до 40 мм должны эксплуатироваться в следующих условиях [19–24]:

- температура окружающей среды – до минус 60 °С и ниже;
- рабочее давление газа для наземных участков – до 15 МПа, для морских – до 25 МПа;
- существенное агрессивное воздействие внутренней и внешней среды на материал труб, что требует защитного покрытия – трехслойного полимерного наружного и однослойного внутреннего;
- сейсмичность земной поверхности – до 9 баллов и др. [25–30].

В связи с прогнозируемой тенденцией уменьшения запасов природного газа в Северном море, а также роли атомной энергетики в Европе ее потребность в российском газе возрастает. В соответствии с «Энергетической стратегией России» строятся новые магистральные газопроводы, связывающие месторождения за Полярным кругом и на шельфе Северного Ледовитого океана с Европой, прежде всего по дну Черного и Балтийского морей [31–39].

Наряду с этим увеличивается импорт российских энергоносителей в крупнейшие азиатские страны [40–44], прежде всего, в Китай, предполагается построить газопровод из Сахалина в Японию. Следует отметить проект строительства новых газопроводов, соединяющих Туркмению с Афганистаном, Пакистаном и Индией. Кроме того, обостряется необходимость модернизации и строительства новых газопроводов, соединяющих Туркмению, Узбекистан и Азербайджан с РФ. Строительство, реконструкция и поддержание в рабочем состоянии внутренних и внешних магистральных газопроводов станет важной задачей ближайших десятилетий. Такая глобальная тенденция, в свою очередь, предусматривает развитие транспортной инфраструктуры этой отрасли: реконструкцию действующих и строительство транзитных газотранспортных систем [45–50]. Осуществление этих масштабных проектов немислимо без самообеспечения страны современными высокопрочными трубами большого диаметра.

Внутренний спрос в России на такую продукцию составляет 2,5–3,0 млн. т в год и по прогнозам специалистов потребность будет увеличиваться. По оценкам экспертов основной сортament потребления составят трубы диаметром 1067–1420 мм, а ежегодная потребность в трубах большого диаметра составит более 7 млн. т. [51]. Пока отечественных труб, соответствующих новейшим техническим требованиям ПАО «Газпром», не хватает. Одношовные трубы диаметром 1220–1420 мм частично закупаются за рубежом. В условиях нестабильности политической обстановки вследствие огра-

ничительных санкций и для обеспечения экономической целесообразности необходимо создание производства отечественных труб большого диаметра.

Получение трубной продукции для магистральных газопроводов с высшими характеристиками качества из собственного штрипса возможно только на новом оборудовании, отвечающем жестким современным требованиям. Для решения этой проблемы в последние годы были запущены крупные инвестиционные проекты:

- толстолистовой стан «5000» в ПАО «ММК» (стоимостью 1,4 млрд. дол.);
- реконструкция стана «3600» на Ижорском заводе в ПАО «Северсталь» (600 млн. дол.);
- стан «5000» на Выксунском металлургическом заводе (1,5 млрд. дол.);
- цех «Высота 239» на Челябинском ТПЗ (880 млн. дол.).

В ПАО «ММК» стан «5000» отличается тем, что имеет унифицированное оборудование как производства трубного штрипса, так и конструкционного стального листа. Высококачественный толстолистовой прокат требуется отечественной атомной промышленности, машиностроению, вагоностроению, судостроению, оборонно-промышленному комплексу. Лист толщиной до 130 мм требуется для судов ледокольного типа, танкеров, других крупнотоннажных судов, танков и бронемашин, для морских буровых платформ, резервуаров для нефтепродуктов, цистерн, воздухонагревателей, опор энергоблоков. Прокат в виде труб большого диаметра и конструкционного листа относятся к высокотехнологичной продукции, соответствующей технологическому переделу четвертого-пятого уровня, а с учетом того, что газ активно добывается и за рубежом, имеет хорошую экспортную перспективу [52 – 57].

Другие российские предприятия имеют ряд существенных ограничений по производству листа требуемых габаритов и качества [см. 45-51].

1.2 Требования к служебным свойствам и составу трубной стали

Для изготовления труб большого диаметра потребовалось производство толстолистового проката с высокими значениями предела прочности (до 690 МПа), предела текучести (до 610 МПа), ударной вязкости (до 200 Дж/см²), обладающим достаточной пластичностью, свариваемостью в различных условиях, коррозионной и хладостойкостью при экономном легировании [58–66].

Трубная сталь для магистральных газопроводов должна быть хладостойкой, характеризующейся определенной долей вязкой составляющей в изломе образцов для ИПГ (DWTТ). Первое поколение трубных сталей имело достаточно высокое содержание углерода и производилось путем горячей прокатки с последующей нормализацией. Для получения требуемой хладостойкости потребовалось перейти к сталям с меньшим содержанием углерода (от стали марок 17Г2АФ, 14Г2АФ-У к малоперлитной стали марки 09Г2ФБ с микролегированием ниобием и ванадием) и освоить технологию контролируемой (термомеханической) горячей прокатки. Это привело к созданию современных прокатных станов и изменению химического состава стали [67].

С увеличением диаметра труб и рабочего давления транспортируемого газа постепенно повышались требования по ударной вязкости трубного металла. Сера уменьшает пластичность и ударную вязкость, особенно в поперечном направлении относительно оси прокатки. При уменьшении содержания серы значения ударной вязкости повышаются, наиболее интенсивно при содержании серы менее 0,010%. В стали с вытянутыми сульфидами возникают напряжения вокруг включений, возможно образование пустот (микротрещин), которые в дальнейшем растут, сливаясь в единую трещину, приводящую к разрыву металла. Чем длиннее включения, тем больше концентрация напряжений. Для достижения требуемой ударной вязкости необходимо проводить глубокую десульфурацию стали и модификацию сульфидных не-

металлических включений. В связи с этим получила мощное развитие ковшевая обработка трубной стали.

Получение по результатам ультразвукового контроля высокой сплошности проката вызвало необходимость снижения содержания растворенного в металле водорода. Для этого используется вакуумная обработка жидкой стали, а также специальная технологическая схема производства проката, включающая замедленное охлаждение листов после горячей прокатки в штабелях. При этом несколько повысилась пластичность стали, что актуально для сталей повышенного класса прочности.

Увеличение требуемой толщины проката более 25 мм привело к развитию технологии в двух направлениях:

- росту толщины непрерывнолитых слябов до 300–400 мм;
- применению технологической схемы термомеханической прокатки с последующим ускоренным охлаждением.

Дополнительные требования по стойкости металла к сероводородному растрескиванию потребовали решения трех основных вопросов: кардинального повышения чистоты металла по неметаллическим включениям; борьбы с ликвационной неоднородностью непрерывнолитого металла и повышения однородности структуры готового проката. Требования были обеспечены путем применения сталей с пониженным содержанием углерода и ликвирующих элементов (в первую очередь марганца), повышением чистоты по сере и фосфору, использованием технологии разливки стали с мягким обжатием, ускоренным охлаждением после прокатки.

Следующий виток повышения требований по ударной вязкости был связан с повышением рабочего давления газа в трубопроводах до 120–200 атм, что привело к повышению норм по ударной вязкости при температуре эксплуатации в отдельных случаях до 250 Дж/см² при высоком уровне прочностных свойств (X70–X80). Решение этого вопроса было найдено путем глубокой десульфурации стали (обычно до 0,001–0,003 % серы), сниже-

ния содержания углерода до 0,04–0,06 % и формирования структуры дисперсного низкоуглеродистого бейнита. Дальнейшее развитие трубных сталей шло в следующих направлениях: создание материалов для проката большей толщины (условно 30 мм и выше) и более высокого класса прочности (К65, Х80) и выше. Здесь уже необходимо применение ускоренного охлаждения проката для формирования требуемой структуры, т.е. задача заключается в том, чтобы либо создать структуру из более низкотемпературных продуктов превращения аустенита, либо сформировать оптимальную дисперсную структуру в толстых сечениях.

Дальнейшее развитие производства трубных сталей класса повышенной прочности происходит путем оптимизации химического состава применительно к сортаменту труб [68–70] и технологии производства проката [71–78]. Например, совершенствование технологии позволило во многих случаях, наряду с микролегирования ванадием, вводить в состав стали элементы, повышающие устойчивость аустенита: хром, никель, медь, молибден. Молибден, помимо высокой прокаливаемости, обеспечивает формирование мелкого рекристаллизованного зерна и подавляет рекристаллизацию аустенита независимо от температуры нагрева сляба под прокатку. Добавка ниобия в молибденсодержащую сталь более эффективна для получения низкотемпературных продуктов превращения.

Современные стали данного класса прочности производятся металлургическими компаниями России, Германии, Японии, Кореи и других стран как по технологической схеме низкотемпературной контролируемой прокатки и последующим охлаждением на воздухе (иногда ускоренным), так и по схеме высокотемпературной контролируемой прокатки с последующим ускоренным охлаждением в зависимости от требований, сортамента, имеющегося оборудования и технологии, экономических соображений. Снижение содержания углерода в связи с повышением температуры превращения ведет к укрупнению ферритного зерна и выделений карбонитридов, поэтому необхо-

димо увеличение содержания аустенитообразующих элементов: марганца, никеля, меди, следует также учитывать и влияние ускоренного охлаждения.

ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» получил заказ на производство электросварных прямошовных труб по проекту «Северный поток-2». Для его выполнения на стане «5000» было необходимо произвести горячекатаный лист толщиной 30,9 и 34,6 мм из ультранизкосернистой стали марки DNV SAWL 485 FD. Согласно ТУ 14-101-944-2016 сталь этой марки должна иметь следующий химический состав, %:

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni
0,04...0,06	0,04...0,12	1,7...1,8	нб 0,0015	нб 0,013	нб 0,08	0,27...0,34
Cu	Mo	Ti	Nb	V	N	
0,20...0,27	0,10...0,16	0,015...0,023	0,039...0,048	нб 0,02	нб 0,008	
Al						
0,025...0,045.						

Суммарное содержание Nb, Ti и V должно быть не более 0,150 %.

Отношение содержания Al к содержанию N (Al/N) – не менее 2,0.

Содержание бора – не более 0,0005%,

содержание кальция – не более 0,004 %,

содержание мышьяка – не более 0,030 %,

содержание олова – не более 0,020 %,

содержание водорода – не более 2,0 ppm.

Трубная сталь должна хорошо свариваться дуговым способом и стыковой сваркой в тяжелых условиях строительства магистральных газо- и нефтепроводов. Сварное соединение должно обеспечивать одинаковую работоспособность и надежность с основным металлом труб. В процессе сварки и после нее могут образовываться горячие и холодные трещины в зоне термического влияния. Металл имеет склонность к упрочнению при охлаждении после сварки. Свариваемость трубных сталей зависит от химического состава

металла и оценивается по специальной характеристике – углеродному эквиваленту. Углеродный эквивалент $C_{эkv}$ (%) рассчитывается по формуле

$$C_{эkv} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15}, \quad (1.1)$$

где C, Mn, Cr, Mo, V, Ni, Cu – содержание углерода, марганца, хрома, молибдена, ванадия, никеля и меди в стали, %.

В формуле (1.1) упрочняющее влияние на металл марганца, хрома, молибдена, ванадия, никеля и меди приводится к влиянию углерода. Величина углеродного эквивалента $C_{эkv}$ определяется и указывается для информации, не являясь браковочным признаком.

Известно [79, 80], что при величине углеродного эквивалента $C_{эkv} > 0,45$ сварка производится электродами, которые обеспечивают минимальное поступление водорода в зону сварки, и с обязательным предварительным подогревом металла. В том случае, если величина углеродного эквивалента $C_{эkv} \leq 0,45$, для сварки также применяются электроды с минимальным поступлением водорода в зону сварки, но подогрев металла нужен только тогда, когда этого требует напряженное состояние трубопровода или низкая температура окружающей среды. При величине углеродного эквивалента $C_{эkv} \leq 0,41$ могут использоваться любые электроды без подогрева металла.

Для стали марки DNV SAWL 485 FD величина углеродного эквивалента $C_{эkv}$ в среднем составляет 0,41 %.

Параметр стойкости стального листа против растрескивания P_{cm} (%) определяется по формуле

$$P_{cm} = C + \frac{Mn + Cr + Cu}{20} + \frac{Si}{30} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B, \quad (1.2)$$

где $C, Mn, Cr, Cu, Si, Ni, Mo, V, B$ – содержание углерода, марганца, хрома, меди, кремния, никеля, молибдена, ванадия, и бора в стали, %.

Величина параметра стойкости стального листа из стали марки DNV SAWL 485 FD против растрескивания P_{cm} имеет среднее значение 0,17 % (допустимые значения находятся в интервале 0,14...0,19 %).

Выводы по первой главе

1 В России и за рубежом постоянно растет спрос на трубы большого диаметра для магистральных газопроводов, эксплуатируемых в экстремальных северных условиях, агрессивной морской среде и др.

2 Для изготовления труб большого диаметра требуется толстолистовой прокат с высокими значениями пределов прочности и текучести, ударной вязкости, обладающий достаточной пластичностью, свариваемостью в различных условиях, коррозионной и хладостойкостью при экономном легировании.

3 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» получил заказ на производство горячекатаного листа толщиной 30,9 и 34,6 мм из ультранизкосернистой стали для изготовления электросварных прямошовных труб по проекту «Северный поток-2».

4 В ККЦ ПАО «ММК» потребовалось разработать технологию производства слябовых непрерывнолитых заготовок из ультранизкосернистой стали марки DNV SAWL 485 FD.

ГЛАВА 2 ДЕСУЛЬФУРАЦИЯ МЕТАЛЛА

2.1 Сера в стали и принципы десульфурации

Для стали практически всех марок сера является вредной примесью. Сера вызывает снижение механической прочности и свариваемости металла, ухудшение его электротехнических, антикоррозионных и других служебных свойств [81-86]. Отрицательное влияние серы на свойства стали обычно сказывается уже при ее содержании 0,005...0,010 %. Только в автоматную сталь сера вводится специально в количестве 0,10...0,30 % для повышения обрабатываемости металла резанием вследствие получения ломкой стружки на станках-автоматах при изготовлении метизов [87, 88].

В жидком железе сера растворяется хорошо, ее концентрация может достигать до 38 % [89]. Сульфид железа FeS растворимо в жидком металле и практически нерастворимо в твердом состоянии. Чистый сульфид железа имеет температуру плавления 1190 °С, а оксисульфидный расплав представляет собой эвтектику $FeO-FeS$ со значительно меньшей температурой затвердевания ~ 988 °С [90, 91]. Поэтому при кристаллизации металла происходит выделение сульфида и оксисульфида железа в жидком виде. Выделяющиеся сульфидные включения располагаются по границам зерен металла в виде тонких пленок. Образование жидких пленок резко снижает прочность металла при температурах красного каления (>1000 °С) и под воздействием внешнего давления вызывает красноломкость:

- наличие горячих трещин на непрерывнолитых заготовках;
- образование рванин, трещин и других поверхностных дефектов на прокате;
- плохое сваривание внутренних усадочных пустот литого металла в процессе прокатки.

Сера отрицательно влияет на такие служебные свойства стали, как ударная вязкость (рисунок 2.1), пластичность, предел выносливости, прочностные свойства, особенно при низких температурах (ниже -30°C), что вызывает хладноломкость стали.

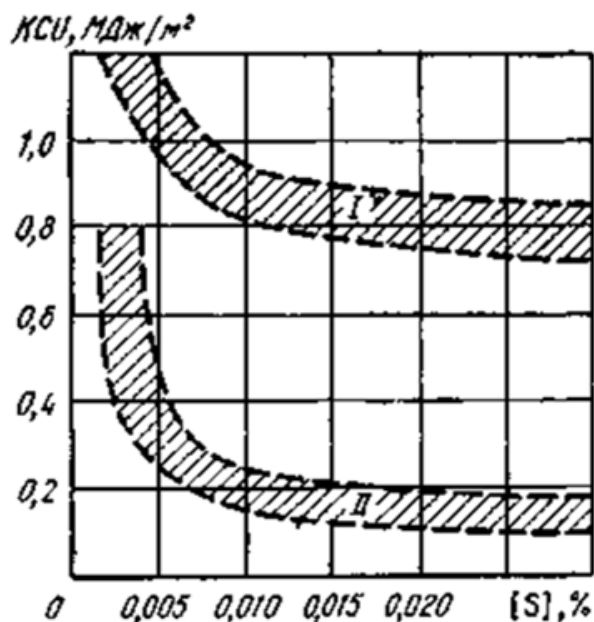


Рисунок 2.1 – Зависимость ударной вязкости стали, раскисленной алюминием, от содержания серы в продольных (I) и поперечных (II) образцах проката

Для снижения анизотропии ударной вязкости проката необходимо иметь содержание серы в стали меньше 0,005 %.

Сульфиды и оксисульфиды железа в процессе прокатки легко деформируются и вытягиваются вдоль проката. Это приводит к анизотропии (различию) свойств металла в продольном и поперечном направлениях: в поперечных образцах прочностные свойства металла оказываются в несколько раз ниже, чем в продольных образцах. Снижение прочностных свойств стали с повышением содержания серы объясняется тем, что выделяющиеся из металла сульфидные и оксисульфидные включения нарушают сплошность металла, при этом сами включения имеют незначительную прочность, являясь хрупкими, особенно при низких температурах. Это особенно опасно для тол

стого горячекатаного листа, из которого изготавливаются трубы магистральных газо- и нефтепроводов, работающих на морском шельфе в северных условиях.

Повышенное содержание серы также снижает коррозионную стойкость стали. Как показали японские исследователи, в низколегированной стали, предназначенной для изготовления труб, по которым транспортируется нефть с высоким содержанием H_2S , содержание серы должно быть снижено до 0,0005%.

С целью снижения отрицательного влияния серы на свойства стали необходимо всегда стремиться получать возможно низкое содержание ее в готовом металле и обеспечивать выделение сульфидных и окисульфидных включений в форме глобулей, практически не деформирующихся в процессе обработки металла давлением.

Марганец обладает более высоким сродством к сере в сравнении с железом и образует с серой тугоплавкое (температура плавления – 1640 °С) соединение MnS и практически исключает явление красноломкости металла. Поэтому необходимо иметь достаточно высокое отношение содержания марганца в готовой стали к содержанию серы $[Mn]/[S] > 20-22$.

Для снижения вредного влияния серы на служебные свойства стали необходимо вводить в металлический расплав кальций, который образует с серой практически нерастворимые в жидком железе сульфиды кальция. Кальций имеет высокое сродство к кислороду и является сильным раскислителем стали. При этом образуются комплексные неметаллические включения, состоящие из оксидов кальция и оксидов алюминия с разным стехиометрическим соотношением компонентов. По диаграмме состояния системы $CaO-Al_2O_3$ [92] неметаллические включения могут находиться в стали в жидком состоянии при температуре ковшевой обработки 1600...1630 °С в том случае, если образуется соединение вида $12CaO \cdot 7Al_2O_3$. Это возможно при содержании оксида кальция в неметаллических включениях от 45 до 55 % и

оксида алюминия от 55 до 45 %. Для получения такого соотношения компонентов в неметаллических включениях величина отношения $[Ca]/[Al]$ в металле в конце ковшевой обработки стали должна составлять 0,61...0,91. Легкоплавкие неметаллические включения $12CaO \cdot 7Al_2O_3$ практически не смачивают металл и достаточно быстро удаляются из расплава. Оставшиеся в металле включения имеют глобулярную форму, небольшие размеры и слабо деформируются в процессе обработки металла давлением. Это способствует снижению анизотропии служебных свойств толстого горячекатаного листа, что очень важно для труб газо- и нефтепроводов, особенно в районах Севера. Металл этих труб в первую очередь должен иметь высокую прочность в поперечном направлении, в котором он подвергается растягивающим напряжениям. Поэтому в настоящее время для изготовления труб большого диаметра применяется сталь с ультранизким содержанием серы – не более 0,0015 %, раскисленная кальцием.

Хорошие результаты по снижению отрицательного влияния серы на свойства стали также достигаются при раскислении-легировании стали редкоземельными металлами (РЗМ, лантаноиды), благодаря образованию тугоплавких и труднодеформируемых сульфидов и оксидов типа Ce_2S_3 и Ce_2O_3 .

В целом для уменьшения отрицательного влияния серы на свойства стали необходимо всегда стремиться получать возможно низкое содержание ее в готовом металле и обеспечивать выделение сульфидных и оксисульфидных включений, имеющих преимущественно форму глобулей и практически не деформирующихся во время обработки давлением. Теоретически содержание серы в стали может быть снижено до $<0,0005\%$, в некоторых случаях до $<0,0001\%$.

Следует отметить, что на практике десульфурация металла осуществляется на разных стадиях сталеплавильного производства: при ковшевой обработке чугуна, в собственно сталеплавильном агрегате, на выпуске из него и

при ковшевой обработке стали. На всех стадиях доминирующим являются процессы перевода серы из металла в шлак.

Поэтому, прежде всего, необходимо рассмотреть влияние химического состава шлака на его десульфурную способность.

Коэффициент распределения серы между металлом и шлаком в условиях равновесия описывается уравнением [93]:

$$\lg L_{\text{сн}} = -2,78 + 0,86 \frac{(\%CaO) + 0,05(\%MgO)}{(\%SiO_2) + 0,6(\%Al_2O_3)} - \lg a_o + \lg f_s, \quad (2.1)$$

где $(\%CaO)$, $(\%MgO)$, $(\%SiO_2)$, $(\%Al_2O_3)$ — содержание соответствующих оксидов в шлаке, %;

a_o — активность кислорода в металле, %;

f_s — коэффициент активности серы в металле.

Поскольку коэффициент активности серы в металле для конкретной марки стали величина практически постоянная, оценим влияние химического состава шлака и окисленности стали (факторы, которые можно изменять) на коэффициент распределения серы. Расчеты по уравнению (2.1) для одного и того же химического состава стали и для рафинировочного шлака, содержащего постоянное количество $MgO - 10\%$ и $Al_2O_3 - 20\%$ показывают, что коэффициент распределения серы существенно возрастает при основности шлака выше 4 и окисленности металла ниже 15 ppm.

Таким образом, подобрав оптимальный химический состав рафинировочного шлака и глубоко раскислив металл, можно в значительной мере повысить коэффициент распределения серы между металлом и шлаком, то есть, провести более глубокую десульфурацию.

В то же время известно, что жидкоподвижные основные шлаки разъедают футеровку шлакового пояса, поэтому в рафинировочных шлаках в обязательном порядке должен присутствовать оксид магния.

Во избежание этого в ковш после выпуска стали или на агрегате «ковш-печь» присаживают магнезитовые флюсы, чтобы уменьшить воздей-

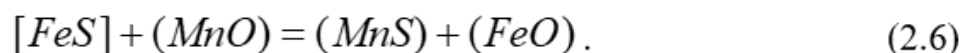
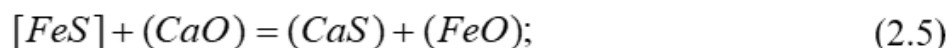
ствие шлака на футеровку. При этом учитывают, что в основных шлаках оксид магния при содержании до 5 % разжижает шлак, в диапазоне 6–8 % – практически не изменяет вязкость шлака, а свыше 10 % — загущает шлак.

Десульфурация стали наиболее полно осуществляется известковыми шлаками, способствующими образованию сульфида кальция CaS . Поскольку сера обладает высокой поверхностной активностью в жидкой стали, процесс десульфурации осуществляется, главным образом, на поверхности раздела металл–шлак.

Согласно современным представлениям, механизм процесса десульфурации может быть представлен следующей схемой [см. 81–84]:



Часто в технической литературе встречается следующее написание



Константы равновесия этих реакций выражаются соотношениями:

$$K_s = \frac{(CaS)(FeO)}{(FeS)(CaO)} \quad (2.7)$$

$$K_s = \frac{(MnS)(FeO)}{(FeS)(MnO)} \quad (2.8)$$

$$K_s = \frac{a_{(S^{2-})} a_{[O]}}{a_{[S]} a_{(O^{2-})}} = \frac{\gamma_{(S^{2-})} x_{(S^{2-})} f_{[O]} [O]}{f_{[S]} [S] \gamma_{(O^{2-})} x_{(O^{2-})}}, \quad (2.9)$$

где $x_{(S^{2-})}$, $x_{(O^{2-})}$ – ионные доли серы и кислорода в шлаке, вычисленные от

общего числа ионов (анионов и катионов);

$f_{[S]}, f_{[O]}, \gamma_{(S^{2-})}, \gamma_{(O^{2-})}$ — коэффициенты активности их в металле и шлаке.

Зависимость константы равновесия от температуры выражается уравнением (коэффициенты активности приняты близкими к единице)

$$\lg K_S = \lg \frac{x_{(S^{2-})}[O]}{[S]x_{(O^{2-})}} = -\frac{6500}{T} + 2,625. \quad (2.10)$$

Коэффициент распределения серы между шлаком и металлом может быть определен из зависимости (2.9)

$$L_S = \frac{(S)}{[S]} \approx \frac{x_{(S^{2-})}}{[S]} = K_S \frac{\gamma_{(O^{2-})}f_{[S]}x_{(O^{2-})}}{\gamma_{(S^{2-})}f_{[O]}[O]} = K'_S \frac{x_{(O^{2-})}}{[O]}, \quad (2.11)$$

где K'_S — комплексная константа, включающая константу равновесия и коэффициенты активности, то есть величина, зависящая как от температуры K_S , так и от состава ($f_{[S]}, f_{[O]}$) и шлака ($\gamma_{(S^{2-})}, \gamma_{(O^{2-})}$).

Кроме того, в выражении (2.11) есть члены, более конкретно выражающие влияние компонентов металла и шлака на величину L_S : содержание кислорода в металле $[O]$ и ионная доля его в шлаке $x_{(O^{2-})}$.

Таким образом, удаление серы из металла происходит тем полнее, чем выше содержание в шлаке CaO и чем ниже окисленность металла. Как уже отмечалось, сера является поверхностноактивным элементом. По данным силы связи в системе $Fe-S$, характерные для сульфидного расплава, меньше, чем силы в системе $Fe-Fe-S$, определяющие взаимодействие поверхностного слоя в сплавах железа и серы с нижележащими подповерхностными слоями. Это и отличает природу поверхностного слоя сплава $Fe-Fe-S$ от природы сульфидного расплава. С одной стороны, силы связи в системе $Fe-$

$Fe—Fe$ больше, нежели в комбинации $Fe—Fe—S$, и это приводит к «выплескиванию» серы и сопутствующих ей атомов железа из объема расплава в поверхностный слой. Исходя из этого, с точки зрения кинетики процесса, тормозящим звеном удаления серы может быть одна из следующих стадий:

- диффузия компонентов Fe , S , O внутри расплава к межфазной границе металл-шлак;
- реакция на границе металл-шлак или вообще акт перехода серы через межфазную границу;
- диффузия продуктов процесса (Fe^{2+} , S^{2-}) от границы металл-шлак в толщу шлака или встречная диффузия ионов кислорода.

Исследованиями установлено, что с большой долей вероятности лимитирующим звеном процесса десульфурации является именно диффузия серы в шлаке. Опытным путем было определено ускорение процесса десульфурации и достижение его равновесия при понижении вязкости шлака или при уменьшении слоя шлака. Было установлено, что скорость десульфурации значительно возрастает при механическом перемешивании шлака. Следовательно, можно считать, что скорость десульфурации основными шлаками определяется скоростью отвода ионов серы от границы раздела фаз металл-шлак вглубь слоя шлака. Исходя из этого, при работе на агрегате «ковш-печь» большое значение уделяется перемешиванию металла и шлака за счет продувки аргоном.

Перемешивание металла под шлаком в процессе обработки в ковше обеспечивает достаточно эффективное удаление серы. На рисунке 2.2 приведена зависимость содержания серы от длительности перемешивания (обработки). В ходе обработки система «металл—шлак» не приходит в равновесие, то есть, фактическое содержание серы в стали всегда выше равновесного. Влияние мощности перемешивания на коэффициент эффективной диффузии серы приведено на рисунке 2.3 и характеризует ускорение и более полное протекание процесса десульфурации при увеличении мощности переме-

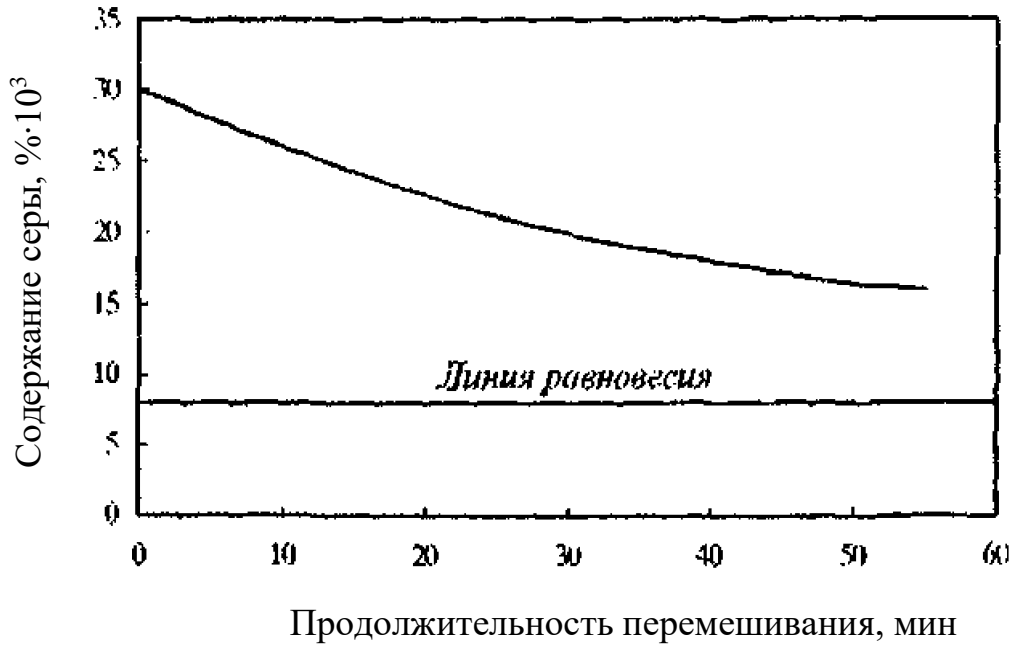


Рисунок 2.2 – Зависимость содержания серы в стали от продолжительности перемешивания



Рисунок 2.3 – Зависимость коэффициента эффективной диффузии серы от мощности перемешивания

шивания. В то же время, при перемешивании имеется вероятность увеличения содержания в стали неметаллических включений, как за счет эмульгиро-

вания шлака и затягивания его конвективными потоками в металл, так и за счет окисления оголенного металла в районе «аргонного пятна». Кроме того, оголение зеркала металла способствует увеличению газонасыщенности стали.

С целью повышения интенсивности десульфурации используется двухстадийный ввод кальцийсодержащего материала. В результате первого ввода существенно снижается содержание кислорода в стали и шлаке, увеличивается сульфидная емкость рафинировочного шлака. Влияние температуры на коэффициент распределения серы L_S может быть прямым и косвенным. Прямое влияние связано с тепловым эффектом процесса перехода серы из металла в шлак. Этот процесс является экзотермическим, поэтому при постоянстве других условий, чем выше температура, тем меньше L_S , но это влияние незначительно, так как тепловой эффект процесса небольшой ≈ 42 кДж/моль. Косвенное влияние температуры на L_S аналогично влиянию на коэффициент распределения фосфора: при высокой температуре можно обеспечить повышенную жидкоподвижность и основность шлака, которая способствует увеличению $x_{(O^{2-})}$ и L_S . С повышением температуры ванны жидкого металла эффективнее протекает десульфурация, так как в таких условиях легче навести высокоосновный гомогенный шлак.

Изучение влияния химического состава металла на коэффициент распределения серы показывает, что при изменении состава металла изменяется содержание кислорода $[O]$ и коэффициент активности серы в металле $f_{[S]}$. Как видно из рисунка 2.4, углерод и кремний повышают активность серы в жидком металле благодаря образованию соединений с железом и вследствие высокой поверхностной активности, а марганец уменьшает ее вследствие образования соединений с серой.

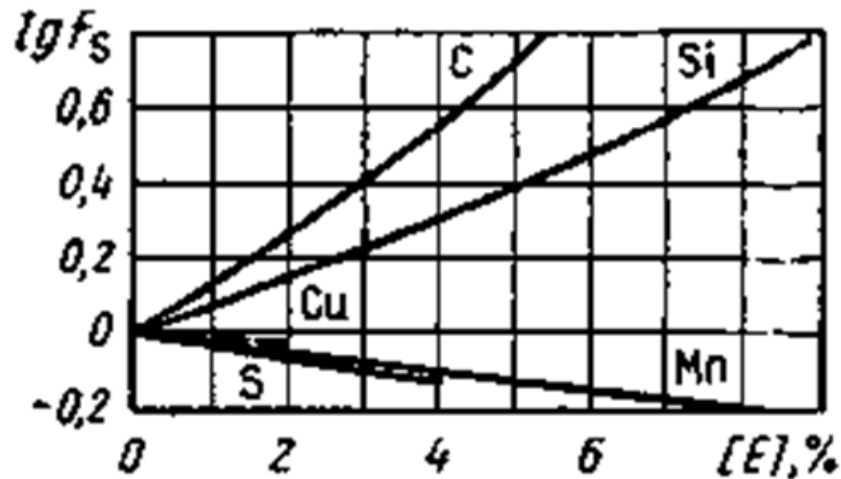


Рисунок 2.4 – Зависимость коэффициента активности серы при 1600 °C от содержания в железе различных элементов [E]

В металле содержание кремния и марганца существенно только в начале плавки, к тому же их влияние на активность серы в металле противоположно, поэтому непосредственное влияние кремния и марганца на процесс десульфурации по ходу плавки практического значения не имеет. Их влияние на активность серы в металле и процесс десульфурации существенно только в период раскисления и легирования.

Углерод оказывает существенное влияние на активность серы по ходу плавки, так как его концентрация велика и степень влияния на $f_{[S]}$ максимальна. В начале плавки обычно $[C]=2,0 - 3,5$ % и этому соответствует $\lg f_{[S]}=0,25 - 0,5$ (см. рисунок 2.4) или $f_{[S]}=2 - 3$, то есть активность серы в расплаве $Fe - C - S$ с указанным содержанием углерода в два-три раза больше, чем в расплаве $Fe - S$ в области низких концентраций серы (до 0,1 % S, при котором $\lg f_{[S]}\approx 0$ или $f_{[S]}\approx 1$). В конце плавки содержание углерода в металле обычно составляет 0,3 – 0,6 % и $f_{[S]}=1,25$, то есть влияние его на активность серы существенно меньше, но все же сохраняется. Лишь при выплавке низкоуглеродистой стали в конце плавки влияние всех примесей (включая углерод) на активность серы в металле пренебрежимо мало. Кроме того, по

ходу плавки, чем выше содержание углерода в металле, тем меньше концентрация кислорода.

Из-за существенного влияния концентрации углерода на активность серы в металле и его окисленность десульфурация лучше протекает в области высоких содержаний углерода, если при этом обеспечивается формирование высокоосновного гомогенного шлака. Часто высокой концентрации углерода в металле соответствуют низкая температура ванны и связанная с ней малая основность шлака, поэтому на практике не всегда наблюдается положительное влияние высокой концентрации углерода на десульфурацию металла.

Согласно зависимости (2.10), из примесей металла влияние кислорода на L_s может быть наиболее существенным, поскольку диапазон изменения $[O]$ при плавке стали очень велик: от $\sim 0,001\%$, достигаемого при глубоком вакуумно-углеродном раскислении или раскислении при помощи сильных раскислителей (кальция, РЗМ), до $>0,1\%$, наблюдаемого в конце окислительного рафинирования при выплавке особонизкоуглеродистой стали ($<0,05\%$ $[C]$).

Однако в период окислительного рафинирования, который часто используется как единственная возможность десульфурации металла при плавке стали, регулирование $[O]$ практически невозможно, особенно в сторону резкого снижения, требуемого для повышения L_s . При окислительном рафинировании десульфурация получает большее развитие при повышенном содержании марганца в металле. Но это не связано с прямым влиянием $[Mn]$ на активность серы в металле. Как видно из рисунка 2.4, с повышением содержанием марганца коэффициент активности серы снижается, следовательно, должен снижаться и L_s . Марганец металла оказывает существенное положительное влияние косвенно: более высокому $[Mn]$ соответствует высокое содержание в шлаке MnO , который является донором анионов кислорода (повышает $x_{(O^{2-})}$) и ускоряет растворение в шлаке CaO , то есть способствует получению высокоосновного гомогенного шлака. Однако возможности под-

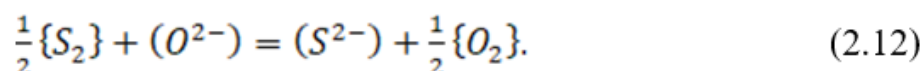
держания требуемого уровня содержаний марганца в металле (0,20–0,25 %) и MnO в шлаке (10–15 %) крайне ограничены.

При окислительном рафинировании изменением химического состава металла практически невозможно существенно улучшить его десульфурацию. Основные возможности улучшения десульфурации металла заложены в изменении химического состава шлака.

В современных сталеплавильных агрегатах осуществляется интенсивное окислительное рафинирование металла для получения полупродукта с заданными значениями содержания углерода, фосфора и температуры. При этом задача удаления серы из металла в процессе плавки не решается, так как это нереально сделать при наличии высоко окисленного шлака.

Десульфурация стали проводится в процессе ковшевой обработки на агрегате «ковш-печь» под «белым» шлаком, характеризующимся высокой основностью и низкой окисленностью [94–100].

Важной характеристикой шлака является его сульфидная емкость [101]. Сера растворяется в оксидном расплаве в виде сульфидного иона S^{2-} . Она экспериментально определяется по изучению равновесия шлака с серосодержащим газом. То есть изучается равновесие реакции



Сульфидная емкость, выраженная через константу равновесия реакции (2.12), записывается следующим образом:

$$C_S = (S^{2-}) \cdot \left[\frac{p_{O_2}}{p_{S_2}} \right]^{0,5} = K_p \cdot a_{O^{2-}}, \quad (2.13)$$

где (S^{2-}) – содержание серы в шлаке, % (мас.); p_{S_2} – парциальное давление серы в газовой фазе, МПа; p_{O_2} – парциальное давление кислорода в газовой фазе, МПа; K_p – константа равновесия реакции (2.12); $a_{O^{2-}}$ – активность (эффективная концентрация) свободного аниона кислорода O^{2-} в шлаке.

По мнению авторов работы [102] активность свободного аниона кислорода O^{2-} и является истинной основностью шлака, определяющей его физические и химические свойства.

В работах [103, 104] приводятся экспериментальные данные по сульфидной емкости шлаков системы $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ при $1650\text{ }^\circ\text{C}$ в зависимости от состава шлака в мольных долях (рисунок 2.5).

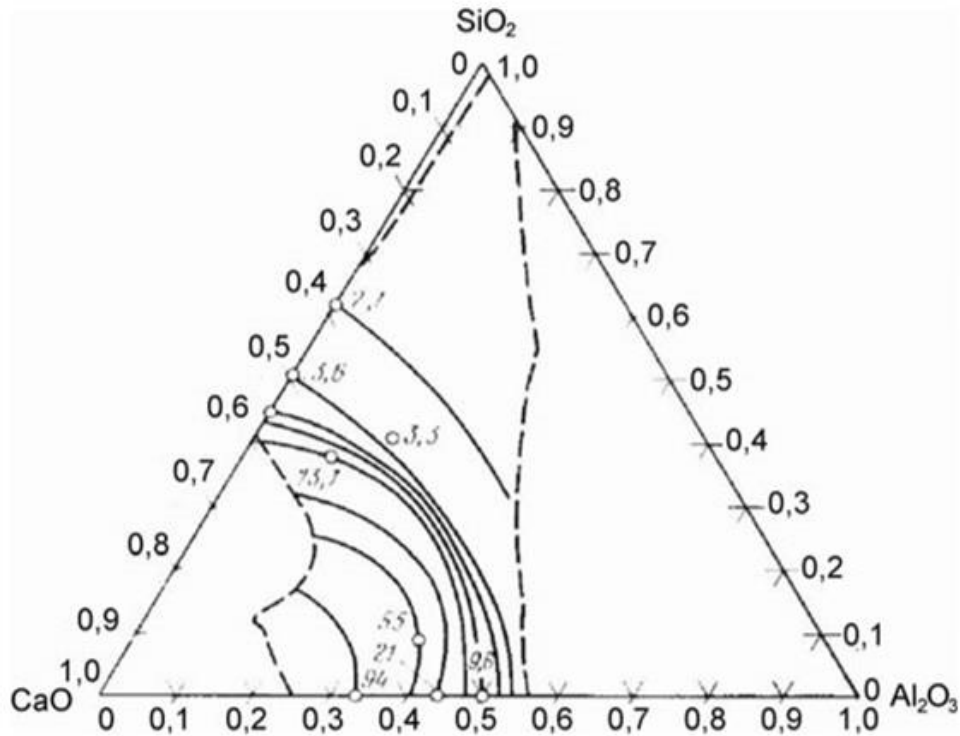


Рисунок 2.5 – Сульфидная емкость $C_S \times 10^4$ ковшевых шлаков $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ в гомогенной области при $1650\text{ }^\circ\text{C}$ в зависимости от состава (мольные доли)

По этим данным для полно раскисленного шлака на агрегате «ковш-печь» сульфидная емкость оказалась равной $0,0055\%$ [см. 100].

Автором работы [105] приводится эмпирическая формула для расчета величины сульфидной емкости шлака

$$\lg C_S = 3,44 \cdot (N_{CaO} + 0,1 \cdot N_{MgO} - 0,8 \cdot N_{Al_2O_3} - N_{SiO_2}) - (9894/T) + 2,05, \quad (2.14)$$

где N_{CaO} , N_{MgO} , $N_{Al_2O_3}$, N_{SiO_2} – мольные доли оксидов кальция, магния, алюминия и кремния;

T – температура шлака, К.

В работе [106] по зависимости (2.14) были рассчитаны значения сульфидной емкости для шлаков при ковшевой обработке трубной стали группы прочности Д, которые изменялись в широком диапазоне 0,0035–0,0186 %. Авторы предложили для оценки эффективности десульфурации интегральный показатель, равный отношению основности шлака к содержанию в нем оксида алюминия (0,39–0,65 %⁻¹). При этом следует отметить, что шлак для ковшевой обработки имел низкие значения основности (1,4–2,6) и содержания оксида алюминия (3,6–5,4 %).

Для получения низкого содержания серы в стали применяется несколько этапов ковшевой обработка металла:

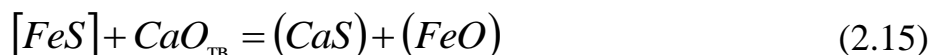
- предварительная обработка жидкого чугуна перед его заливкой в сталеплавильный агрегат;
- ковшевая обработка полупродукта в процессе выпуска его из сталеплавильного агрегата в ковш;
- обработка металла на агрегате «ковш-печь».

2.2 Ковшевая десульфурация чугуна

Из чугуна сера удаляется значительно легче, чем из стали из-за повышенной химической активности серы в чугуне вследствие высокого содержания в нем углерода и кремния.

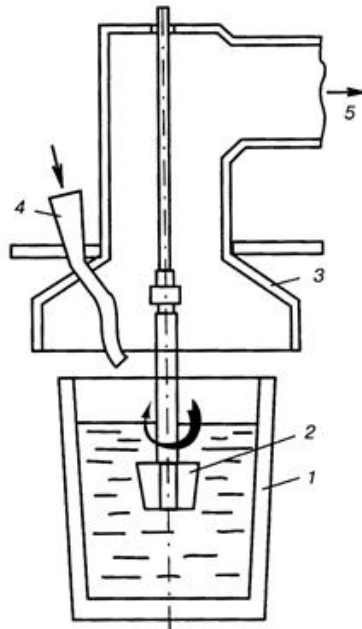
Существует несколько способов ковшевой десульфурации чугуна, в которых применяются разные реагенты: известь, сода, карбид кальция, металлический магний, а также смесь этих материалов [107].

Известь является самым дешевым и доступным материалом, она взрывобезопасна, не разрушает футеровку ковша и не дает вредных выделений в атмосферу в процессе обработки. Однако, прямая реакция



кинетически затруднена, так как известь сначала должна ассимилироваться шлаковой фазой и лишь после этого принять участие в рафинировочном процессе. Расход извести на ковшевую десульфурацию чугуна довольно высок. Даже при применении свежесожженной порошкообразной извести для получения остаточного содержания серы в чугуне менее 0,010 % ее расход колеблется в пределах 10–25 кг/т, что приводит к значительному охлаждению металла (на 30–100 °С), увеличению количества шлака (до 3 %) и его загущению. Это служит причиной потери до 2,5 % чугуна при удалении шлака из ковша после обработки.

В Японии компанией «Nippon Steel» был разработан процесс «KR» («Kanbara Reactor process») (1963 г.). В нем известь используется в качестве основного реагента, иногда с добавлением около 10 % от общего расхода плавленого шпата (CaF_2) или глинозема (Al_2O_3). Реагент вводится в чугун через вращающиеся фурмы (средняя скорость 100–120 об/мин) в потоке газоносителя (обычно азота) или добавляется сверху (рисунк 2.6).



1 - заливочный ковш с жидким чугуном; 2 - ротор-мешалка;

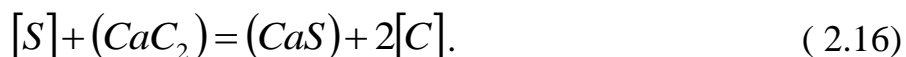
3 - колпак для пылеулавливания; 4 - подача десульфуратора;

5 - отвод газов

Рисунок 2.6 – Схема процесса «KR» («Kanbara Reactor process»)

Фурма оснащена четырьмя массивными лопатками, которые при вращении создают интенсивное перемешивание чугуна в заливочном ковше.

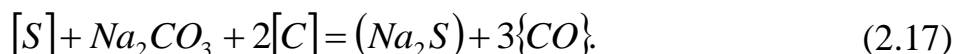
Вследствие перемешивания расплава размер пузырьков транспортирующего газа уменьшается, а время контакта извести в чугуне увеличивается по сравнению со статической инъекцией. Известь используется более эффективно, что позволяет снизить ее расход и использовать материал низкого качества, что удешевляет обработку. Недостатком процесса является повышенный износ футеровки стен заливочного ковша, а также наличие большего свободного борта ковша. Общие потери чугуна при скачивании шлака составляют 2–3 %. При десульфурации чугуна с использованием карбида кальция протекает реакция



При умеренном расходе реагента (5–10 кг/т) и относительно небольшом уменьшении температуры (20–30 °С) возможно снижение содержания серы в чугуне до 0,005 %. Поэтому карбид кальция достаточно широко применяется в зарубежной практике для десульфурации чугуна. Однако использование карбида кальция при ковшевой обработке чугуна сопровождается выделением взрывоопасного газа – ацетилена. Кроме того, карбид кальция заметно увеличивает количество ковшевого шлака (до 2,5 %), делая его «сухим». Содержание корольков металла в таком шлаке достигает 50 %, что ведет к значительным потерям чугуна.

Обработка чугуна кальцинированной содой наибольшее распространение получила в Японии, где одновременно с десульфурацией производится и дефосфорация чугуна.

Реакция десульфурации содой описывается уравнением



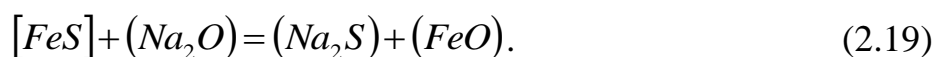
Возможно получение содержания серы в чугуне менее 0,010 % при удельном расходе соды 10–15 кг/т. В связи с большой теплотой диссоциации и плавления соды температура чугуна в процессе обработки снижается на

60–80 °С. Сода является взрыво- и пожаробезопасным материалом, но образование при обработке большого количества летучих веществ (включая испаряющийся Na_2O) приводит к значительным выносам мелкодисперсных пылевидных частиц, что требует наличие дополнительных пылеулавливающих устройств.

С целью устранения этих недостатков применяют плавеную соду. При плавлении соды происходит диссоциация карбоната:



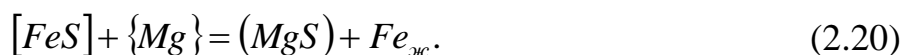
В случае использования плавенной соды реакция десульфурации металла описывается уравнением



Предварительное плавление соды позволяет снизить расход реагента почти в два раза и примерно в полтора раза уменьшить падение температуры чугуна в процессе десульфурации. Для экономии соды ее регенерируют из конечного шлака путем выщелачивания. Естественно это требует создания сложного дополнительного производства.

Одним из самых эффективных и наиболее часто используемых десульфураторов чугуна является магний.

Десульфурация чугуна магнием происходит по реакции



Технологические особенности десульфурации чугуна магнием обусловлены его физическими свойствами: низкой плотностью в твердом (1670 кг/м³) и жидком состоянии (1580 кг/м³), чрезвычайно низкими температурами плавления (651 °С) и кипения (1170 °С). При температуре чугуна 1300–1400 °С введенный в него магний переходит в состояние перегретого пара. Это с одной стороны способствует лучшему контакту десульфуратора с чугуном, а с другой – создает предпосылку для выброса металла из ковша и сгорания паров магния за его пределами в воздушной атмосфере. Поэтому для лучшего протекания процесса десульфурации

чугуна необходимо замедлить испарение магния и увеличить продолжительность его пребывания в глубине металлической ванны.

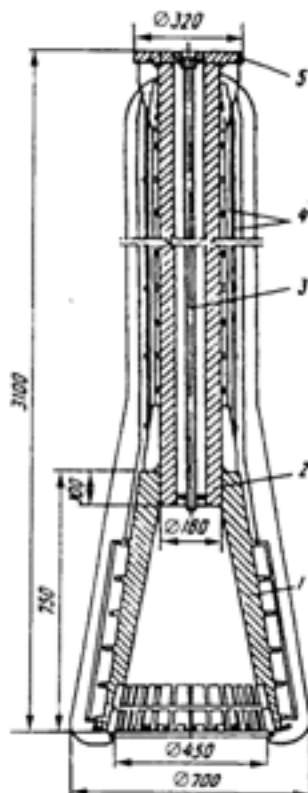
Расход магния для десульфурации не превышает 1–2 кг/т чугуна. Поэтому при десульфурации магнием температура чугуна снижается не более, чем на 15–20 °С .

Одной из основных проблем при десульфурации чугуна магнием является повышение степени его полезного использования. Сначала десульфурацию чугуна магнием осуществляли путем погружения в металл разными способами небольших слитков. При этом основная часть магния, особенно из верхней части слитка, сгорала на поверхности металла. Затем магний стали пассивировать, покрывая хлоридами магния и кальция. Большим шагом вперед стала продувка металла гранулированным магнием (частицы размером 0,5–2,0 мм в соляной пленке) в потоке инертного газа. Существует несколько способов ввода этого десульфуратора:

- через подвижную фурму, опускаемую сверху в металл (процесс «ММІ» «Ukraina–Desmag process»);
- через подвижную фурму, опускаемую сверху в металл, вместе с известью (процесс соинжекции);
- через фурму, встроенную в боковую стенку заливочного ковша (Руставский металлургический завод и фирма «INJECTALL», Англия);
- при помощи порошковой проволоки.

В процессе «ММІ» гранулированный магний с покрытием вводится через фурму в форме колокола (рисунок 2.7).

Колокол на конце фурмы используется в качестве испарительной камеры для магния, чтобы стабилизировать процесс. Также могут использоваться фурмы без испарительной камеры, но в этом случае эффективность использования магния снижается. В обоих случаях испарение магния вызывает достаточную интенсивность перемешивания чугуна, чтобы обеспечить хорошее распределение реагентов в металле.



1- испарительная камера с отверстиями для выхода паров магния; 2 - несущая труба; 3 - канал; 4 - стальная арматура, покрытая огнеупорной обмазкой; 5 - фланец

Рисунок 2.7 – Фурма для ввода магния в чугун

Соинжекция (совместная инжекция) магния и извести – процесс, который сочетает в себе преимущества обоих способов. Магний позволяет быстро удалять серу, а известь – достичь низких ее концентраций. Известь иногда заменяется карбидом кальция, который является более эффективным, но из-за проблем безопасности этот вариант практически не используется на новых металлургических заводах. Совместное введение магния и извести широко используются на многих металлургических предприятия (рисунок 2.8).

Реагенты хранятся в различных бункерах и смешиваются только внутри нагнетательной линии. Десульфураторы вводятся в чугун с помощью подвижной фурмы, опускаемой сверху, с одним отверстием на дне, двумя или

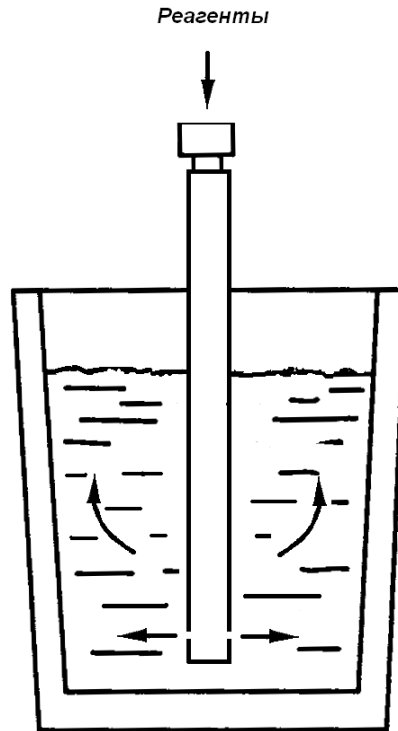


Рисунок 2.8 – Схема процесса соинжекции при помощи Т-образной фурмы

четырьмя боковыми отверстиями. В качестве транспортирующего газа обычно используется азот.

Перемешивание чугуна в ковше создается газом-носителем и магнием, который испаряется. Это обеспечивает достаточно хорошее распределение реагента по всему объему ковша. Преимущество совместной инжекции в том, что отношение между магнием и известью (или CaC_2) можно изменять, если этого требует ситуация.

Пример схемы размещения оборудования для десульфурации чугуна приведен на рисунке 2.9.

Установка включает расходные бункеры (1), распределители реагентов (2), пульт управления (3), устройство для автоматического отбора проб (4), подвижную крышку (5). Перед обработкой ковш с чугуном взвешивается и устанавливается в камеру для обработки. В это время информация о химиче-

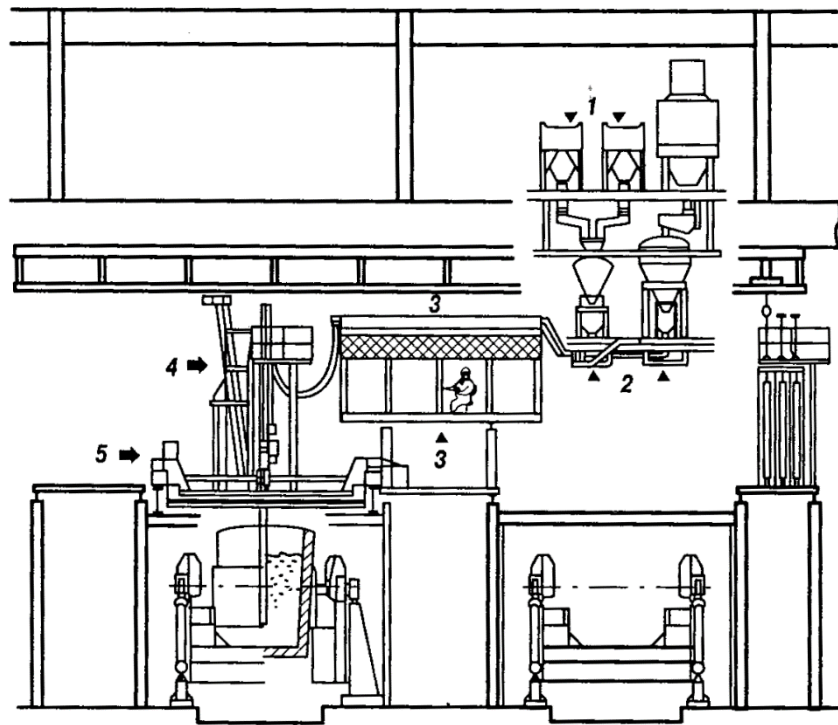


Рисунок 2.9 – Схема установки для десульфурации чугуна

ском составе чугуна, температуре, массе вводится в компьютер, который рассчитывает количество реагентов, необходимых для получения заданного содержания серы. После окончания обработки измеряется температура чугуна и отбирается проба, которая отсылается пневмопочтой в лабораторию аналитического контроля. После получения анализа ковш направляется к конвертерам. Когда в одной камере идет продувка, из другой вынимается ковш с обработанным чугуном и устанавливается новый, полный цикл обработки длится 30–35 мин. Обобщенные технологические показатели установок по десульфурации чугуна приведены в таблице 2.1.

Вдувание гранулированного магния через фурму, встроенную в боковую стенку заливочного ковша, производится на Руставском металлургическом заводе фирмой «INJECTALL» (Англия). Показатели по десульфурации чугуна в этом варианте обработки сопоставимы с процессом «ММІ».

Таблица 2.1 – Основные показатели работы установок по десульфурации чугуна

Показатель	Размерность	Значение
Фракция порошков	мм	0,2–2,0
Температура чугуна	°С	1275–1375
Снижение температуры чугуна при обработке	°С	20–40
Длительность продувки	мин	5–20
Содержание серы в чугуне: - до обработки; - после обработки	% %	0,04–0,06 0,002–0,010
Расход реагентов: - магния; - карбида кальция; - извести (известняка)	кг/т кг/т кг/т	0,2–1,0 0,5–4,0 5–10
Расход газа-носителя	м ³ /(мин·т)	0,001–0,003
Соотношение порошок/газ: - смеси на основе магния; - смеси на основе карбида кальция; - смеси на основе CaO (CaCO ₃)	кг/м ³ кг/м ³ кг/м ³	~10 50–100 до 200

В последнее время широкое распространение получила ковшевая обработка чугуна порошковой проволокой. Порошковая проволока представляет собой трубчатую оболочку, изготовленную из стальной ленты, внутри которой находятся мелкодисперсные реагенты (обычно крупностью менее 0,5 мм). Такая проволока с помощью специальных трайб-аппаратов вводится

в металл, что позволяет доставить реагенты на нижние горизонты жидкого металла. Хорошие результаты достигаются при использовании в качестве десульфураторов смесей разных материалов, например, магнезия и карбида кальция, магнезия и извести или доломита. Здесь флюсы играют роль пассиваторов, препятствующих слишком раннему испарению магнезия. Расход порошковой проволоки, а, следовательно, и расход реагентов, можно точно дозировать.

Рассмотренные способы сопоставимы между собой по эффективности. Поэтому выбор способа десульфурации чугуна должен делаться, исходя из экономических соображений, причем первостепенное значение имеет цена реагентов.

2.3 Ковшечная десульфурация стали

2.3.1 Ковшечная обработка полупродукта в процессе выпуска из агрегата твердой шлакообразующей смесью

В качестве твердых шлакообразующих смесей (ТШС) применяются различные материалы: известь, плавиковый шпат, сода и другие. Основные требования к смесям: низкая температура плавления (не более 1300–1400 °С), высокая серопоглощительная способность получаемого шлака.

Наиболее часто применяются твердые шлакообразующие смеси, состоящие из извести и плавикового шпата. Плавиковый шпат (CaF_2) играет роль компонента, обеспечивающего снижение температуры плавления смеси. Установлено, что уже при содержании 10–12 % фторида кальция смесь имеет температуру плавления не более 1000–1100 °С. Наибольшее распространение получила смесь, состоящая из 75 % извести и 25 % плавикового шпата.

По физико-химической сущности десульфурация при помощи ТШС аналогична десульфурации синтетическим шлаком: главным компонентом

является оксид кальция, который обеспечивает протекание реакции (2.4).

Основное отличие жидкого шлака, полученного из ТШС, от синтетического шлака, состоящего из извести и плавикового шпата, состоит в том, что в синтетическом шлаке разжижитель Al_2O_3 снижает его серопоглодительную способность, а в шлаке, полученном из смеси CaO и CaF_2 , разжижитель CaF_2 повышает его десульфурную способность, поскольку не вступает во взаимодействие с CaO , то есть не снижает его активность, а наоборот, предоставляет дополнительный источник образования катионов Ca^{2+} .

Таким образом, жидкий шлак, полученный из смеси извести и плавикового шпата, безусловно, является достаточно эффективным десульфуратором стали.

Десульфурация с помощью ТШС имеет и недостатки. Во-первых, ТШС является твердым и холодным материалом, поэтому присадка ее в ковш приводит к охлаждению металла. Это ведет к ограничению расхода ТШС, который составляет 1–1,5 % (10–15 кг/т). Во-вторых, при обработке стали в ковше ТШС выделяются летучие фтористые соединения, являющиеся ядовитыми веществами. Поэтому возникает необходимость организации отсоса этих выделений, чтобы исключить загрязнение ими воздуха в цехе.

В современной практике наибольший успех в применении ТШС, состоящей из извести и плавикового шпата, для десульфурации стали достигнут в Японии. Там обработку этой смесью совмещают с циркуляционным вакуумированием, подавая смесь с помощью специальной трубки в объем металла, под всасывающий патрубок вакуумной камеры и обеспечивая тем самым всасывание смеси совместно с металлом в вакуумную камеру. Этим создаются идеальные условия для взаимодействия металла с образующимся шлаком. При этом достигаются наилучшие результаты: при расходе ТШС всего около 0,4 % (4 кг/т) остаточное содержание серы в металле не превышает 0,005%.

2.3.2 Обработка металла на агрегате «ковш-печь»

Основной задачей обработки металла на агрегате «ковш-печь» (АКП) является удаление серы.

2.3.2.1 Наведение «белого» шлака

По физико-химической сущности процесс удаления серы из металла в процессе обработки его на АКП под наведенным «белым» шлаком аналогичен процессу десульфурации металла с помощью жидкого синтетического шлака.

Для определения количества шлака, подлежащего наведению в ковше для достижения требуемой степени десульфурации металла в случае, когда в процессе выпуска металла из конвертера шлак не попадает в ковш, может использоваться формула [см. 89]

$$g_{\text{шл}} = \frac{100 \cdot ([S]_{\text{н}} - [S]_{\text{к}})}{L_s \cdot [S]_{\text{к}} - (S)_{\text{н}}}, \quad (2.21)$$

где $g_{\text{шл}}$ – требуемое количество шлака, которое необходимо в ковше, чтобы снизить содержание серы в металле от начального содержания $[S]_{\text{н}}$

(%) до конечного $[S]_{\text{к}}$ (%), кг/100 кг металла (%);

L_s – коэффициент распределения серы между шлаком и металлом;

$(S)_{\text{н}}$ – начальное содержание серы в наводимом шлаке, зависящее от содержания ее в исходных шлакообразующих материалах (в основном, в извести), %.

Значение коэффициента распределения серы, прежде всего, зависит от химического состава шлака и может меняться в очень широких пределах от 10 до 250. Из рисунка 2.10 видно, что максимальные значения коэффициента

распределения серы относятся к случаям наличия «белого» шлака с содержанием $(FeO)+(MnO) < 1 \%$.

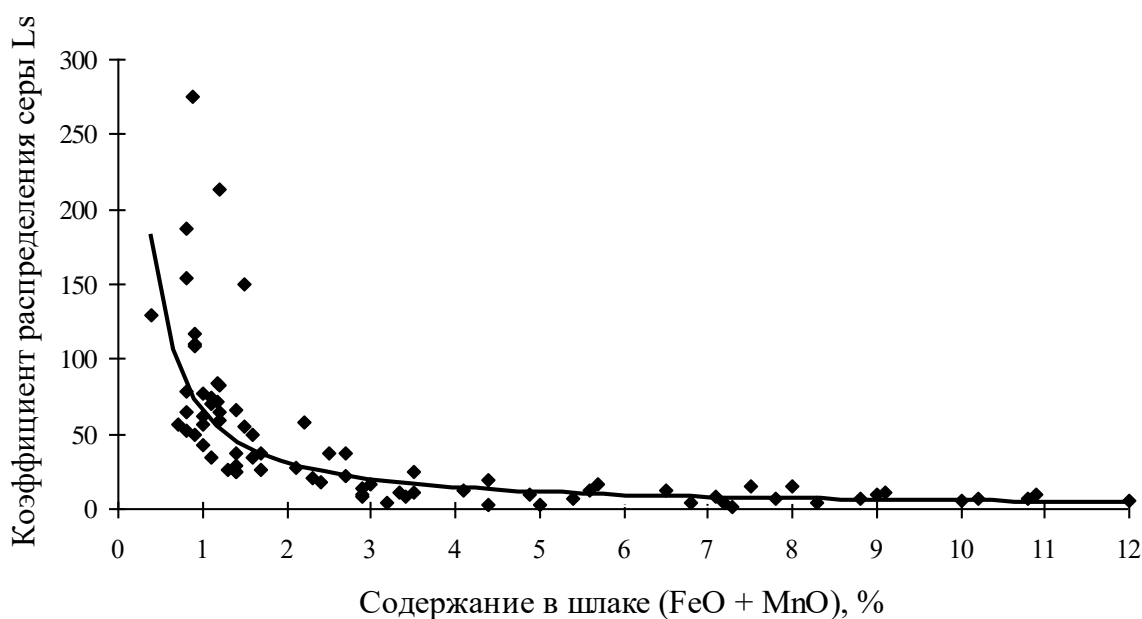


Рисунок 2.10 – Зависимость коэффициента распределения серы между шлаком и металлом (L_s) от содержания $(FeO) + (MnO)$ в шлаке

Благоприятные условия для десульфурации стали под «белым» шлаком создаются вследствие:

- высокой основности шлака (3,8...5,0);
- низкой окисленности шлака из-за его раскисления;
- хорошей жидкоподвижности шлака из-за возможности электродугового подогрева;
- наведения вынужденной циркуляции металла под слоем шлака при продувке аргоном.

2.3.2.2 Вдувание порошкообразных материалов

Десульфурация стали в ковше путем вдувания порошков в струе инерт-

ного газа широко применяется на металлургических предприятиях. В качестве десульфураторов используются шлаковые смеси на основе извести, а также металлические порошки силикокальция, магнезия, редкоземельных металлов или их смеси со шлаковыми порошками. Для термодинамики и кинетики процесса десульфурации очень важными являются высокая реакционная способность вдуваемых порошков и значительная поверхность их взаимодействия с жидким металлом. В этом методе реагент (шлаковые смеси, металлы или порошкообразная известь) вдувается в металл струей газоносителя, который сам оказывает рафинирующее воздействие на металл. Десульфурация стали в ковше продувкой порошками характеризуется максимально высокой скоростью протекания для обеспечения минимальной длительности продувки и уменьшения охлаждения металла в ковше. Поэтому расход десульфураторов должен быть минимальным, то есть они должны иметь высокую десульфураторную способность. Для определения рациональных технологических параметров процесса десульфурации стали в ковше продувкой порошками должны максимально учитываться термодинамические и кинетические особенности рассматриваемого процесса.

Самым распространенным методом ковшевого рафинирования с вдуванием порошков является обработка металла кальцийсодержащими материалами [108–111], чему способствуют следующие свойства кальция:

- Высокое химическое сродство к кислороду, поэтому введение кальция в металл обеспечивает высокую степень его раскисления.
- Высокое химическое сродство к сере, поэтому введение кальция в металл обеспечивает высокую степень его десульфурации и низкое содержание серы после обработки.
- Благоприятное влияние на морфологию неметаллических включений в стали. Одним из наиболее распространенных раскислителей стали является алюминий, при использовании которого в металле образуются тугоплавкие

включения глинозема, ухудшающие чистоту металла, механические свойства изделий из него, а также затрудняющие разливку вследствие зарастания разливочных стаканов. Образующийся при введении кальция оксид CaO , взаимодействуя с частицами Al_2O_3 , обеспечивает возникновение менее тугоплавких неметаллических включений; те из них, которые остаются в металле, имеют очень малые размеры и сферическую форму, не деформируются в процессе обработки металла давлением, не вытягиваются в цепочки остроугольных кластеров, что характерно для включений глинозема и в меньшей степени ухудшают свойства металла. Раскисленная алюминием сталь после введения кальция практически не имеет и пластичных силикатов. Кальций уменьшает также вредное влияние оставшейся в металле серы, так как отрицательное воздействие на механические свойства стали сульфида кальция CaS существенно меньше, чем у сульфида марганца MnS .

– Положительное влияние на скорость удаления включений. Присутствие кальция способствует переводу включений глинозема в жидкие алюминаты кальция, что, в свою очередь, способствует ускорению удаления включений из металла.

– Благоприятное влияние на обрабатываемость стали, что способствует повышению производительности металлообрабатывающих станков благодаря возможности работы на повышенных скоростях резания.

– Положительное влияния на показатели анизотропии свойств, механических свойств и снижение степени сегрегации в крупных слитках для поковок.

Растворимость кальция в металле невелика. В чистом железе растворимость кальция составляет 0,032 %. Обычные примеси стали: углерод, кремний, алюминий, никель повышают растворимость кальция. Наибольшее влияние оказывает углерод: 1 % C повышает растворимость кальция почти вдвое. Физические и химические свойства кальция: кристаллическая решетка α - Ca , устойчивая при обычной температуре – гранецентрированная кубиче-

ская, выше 464 °С – устойчивая гексагональная форма β -Ca; плотность кальция при 20 °С равна 1,54 г/см³; температура плавления – 851 °С, температура кипения – 1482 °С; теплопроводность при 20 °С – 125,6 Вт/(м·К); удельная теплоемкость (0–100 °С) – 623,9 Дж/(кг·К). Кальций достаточно высокой чистоты пластичен, хорошо прессуется, прокатывается и подвергается обработке резанием.

Химический элемент кальций обладает очень высокой активностью. Он при обычной температуре легко взаимодействует с кислородом и влагой воздуха, поэтому его хранят в герметически закрытых сосудах или под минеральным маслом. На воздухе при нагревании (или в кислороде) кальций воспламеняется, образуя оксид CaO . Также известны соединения кальция CaO_2 и CaO_4 . Кальций с холодной водой взаимодействует сначала быстро, затем реакция замедляется, вследствие образования пленки $Ca(OH)_2$. С горячей водой кальций взаимодействует энергично. С сухим водородом взаимодействует при 300–400 °С, кальций образует гидрид CaH_2 ; при 500 °С кальций и азот образуют нитрид Ca_3N_2 . При нагревании без доступа воздуха с графитом, кремнием или фосфором кальций образует соединения CaC_2 , Ca_2Si , $CaSi$, $CaSi_2$, Ca_3P_2 .

Введение кальция в сталь характеризуется рядом особенностей: большим пироэффектом, малой степенью усвоения и, соответственно, повышенной стоимостью обработки. Поэтому распространение получили два приема работы:

- введение кальция в составе различных сплавов, смесей, соединений;
- введение кальция в виде этих смесей и соединений не на поверхность, а вглубь металла (инжекция).

Вдувание в металл порошков в ковше может использоваться также для получения стали с регламентированным содержанием азота, для легирования металла кремнием, никелем, молибденом, вольфрамом, свинцом. Для получения низкосернистой азотсодержащей стали могут использоваться смеси,

содержащие цианамид кальция $CaCN_2$. В этом случае газом-носителем служит азот. Переход азота в металл из газа-носителя облегчается при снижении в стали содержания кислорода и серы (кислород и сера – поверхностно активные элементы, препятствующие переходу азота в металл). В случае вдувания в ковш в струе азота порошка CaO с 10 % Mg по мере рафинирования металла от серы и кислорода содержание азота возрастает и особенно заметно на заключительной стадии продувки, когда содержание серы снижается до 0,02 %, а кислорода до 0,005 % и менее.

Реагенты в виде порошков могут вводиться в металл следующим образом:

- через фурму сверху;
- через отверстие стакана в шиберном затворе снизу;
- через подводный патрубок (или через камеру над подводным патрубком) агрегата «ковш–печь».

При использовании метода продувки порошками роль футеровки ковша и шлака становится особенно заметной. Интенсивное перемешивание металла и шлака ускоряет все процессы, протекающие на границах раздела фаз. При вдувании порошкообразных материалов в ковш удаление серы происходит как на границе металла со шлаком, так и на поверхности всплывающих частиц вдуваемого материала. Роль шлака в ковше велика: из металла нельзя удалить больше серы, чем ее может поглотить шлак. При наличии основного шлака в ковше, футерованном доломитом, даже только продувка одним аргонном уже приводит к заметному снижению содержания серы. В случае обработки сталей, раскисленных алюминием, использование для футеровки ковшей основных огнеупоров позволяет получить менее окисленный металл.

Вместе с такими кальцийсодержащими соединениями, как силикокальций и карбид кальция, для продувки порошками применяются и другие материалы, в частности магний в смеси с известью или плавиковым шпатом, смесь извести с плавиковым шпатом, а также синтетические жидкие или

твердые смеси на основе извести, глинозема и плавикового шпата, порошкообразная известь. В зависимости от состава стали и применяемого метода обработки расход смесей колеблется от 1 до 5 кг/т металла. Высокая степень чистоты стали достигается в том случае, если после выпуска происходит дальнейшее снижение концентрации кислорода. Поскольку при плавке стали с невысоким ($< 0,15\%$) содержанием углерода металл заметно более окислен, более чистой оказывается сталь, обработанная магнием или магниесодержащими сплавами (это объясняется более благоприятными условиями удаления глобулярных включений, содержащих магний).

Применение карбида кальция и силикокальция оказывает одинаковое раскисляющее воздействие: они в равной мере влияют на степень чистоты стали. Однако карбид кальция можно использовать для обработки стали, содержащей $> 0,2\%$ углерода. Для обработки стали с содержанием не более $0,15\%$ углерода необходимо использовать более дорогостоящий силикокальций.

Сейчас для десульфурации стали продувкой порошками в ковше применяются различные материалы:

- шлакообразующие смеси на основе извести (CaO , $CaO-CaF_2$, $CaO-CaF_2-Al_2O_3$) с различным соотношением компонентов;
- флюидизированная известь, представляющая собой мелкий порошок, частицы которого покрыты специальным составом-флюидизатором (например, силиконовым маслом); характеризуется низкой гигроскопичностью, высокими реакционной способностью в расплаве металла и текучестью, обеспечивающей беспрепятственный проход по всем пневмотранспортным системам и магистралям; качество флюидизированной извести определяется ее химическим и гранулометрическим составами [112-115], а также текучестью, которая характеризуется углом естественного откоса:

содержание фракции более 1 мм	не допускается;
содержание фракции менее 100 микрон	не менее 96 %;

содержание оксидов кальция и магния	не менее 95 %;
содержание оксида магния	не более 8 %;
содержание влаги	не более 2 %;
потери массы при прокаливании	не более 3 %;
угол естественного откоса частиц	не более 25 °;
насыпная плотность во флюидизированном состоянии	0,7 г/см ³ ;
насыпная плотность в осевшем состоянии	1,0 г/см ³ ;

– металлические порошки (магний, силикокальций, CaC_2 , $CaCN_2$, $CaCl_2$);

– смеси шлакообразующих и металлических порошков ($CaO+Mg$; $CaO+SiCa$; $CaO+CaF_2+Al$; $CaO+CaF_2+SiCa$).

Составы применяемых для обработки металла смесей колеблются в широких пределах. Особую роль в составе смесей выполняет алюминий.

Выводы по второй главе

1 Во всех, кроме автоматных, сталях сера является нежелательным компонентом, вызывая снижение механической прочности, ударной вязкости (особенно в поперечном прокатке направлении) и свариваемости металла, ухудшение его электротехнических, антикоррозионных и других служебных свойств.

2 Вредное влияние серы на свойства стали снижается при увеличении содержания в ней марганца, кальция, редкоземельных металлов.

3 Удаление серы из чугуна проходит более активно, чем из стали из-за более высокого содержания в металле углерода и кремния.

4 Существует несколько способов ковшевой десульфурации чугуна, в которых применяются разные реагенты: известь, сода, карбид кальция, металлический магний, флюидизированная известь, а также смесь этих

материалов с использованием механического перемешивания, соинжекции, инъекции в потоке азота.

5 Процесс десульфурации стали может быть эффективно реализован при условии глубокого раскисления металла и наличии высокоосновного низкоокисленного жидкоподвижного шлака в сочетании с перемешиванием металла под шлаком вследствие продувки аргоном.

6 Глубокая десульфурация стали достигается поэтапной ковшевой обработкой полупродукта в процессе выпуска из агрегата твердой шлакообразующей смесью, состоящей из извести и плавикового шпата, с последующей обработкой расплава на агрегате «ковш-печь» под «белым» шлаком и вдуванием порошкообразных материалов: силикокальция, карбида кальция, флюидизированной извести и других реагентов.

ГЛАВА 3 БАЗОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБНОЙ СТАЛИ В ККЦ

В кислородно-конвертерном цехе ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» производство трубной стали осуществляется по следующей схеме (рисунок 3.1).

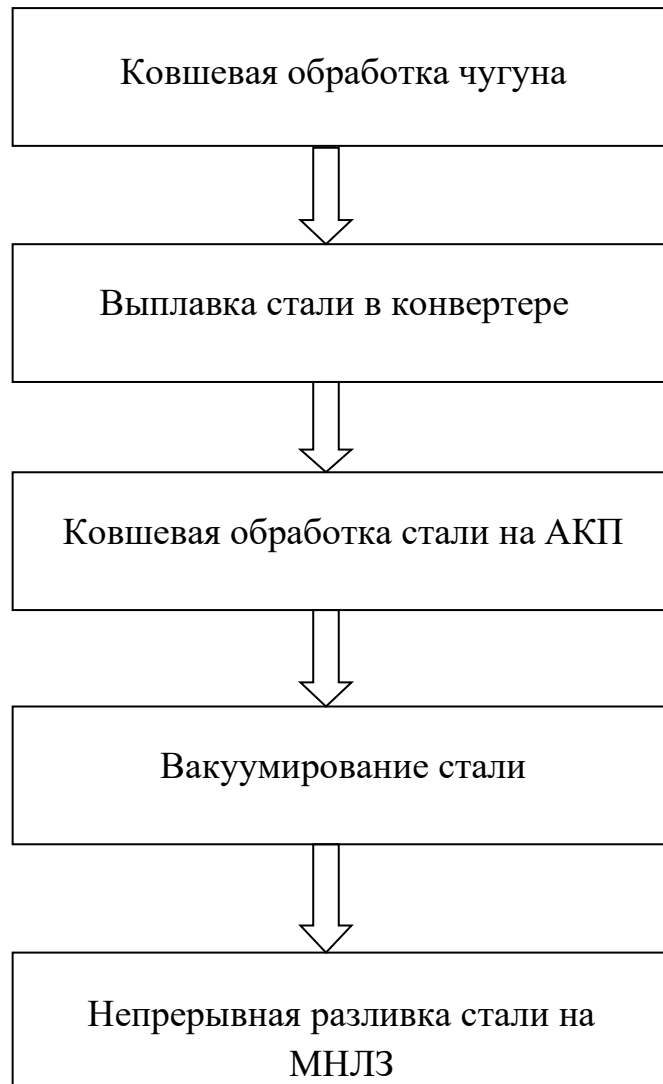


Рисунок 3.1 – Технологическая схема производства трубной стали
в кислородно-конвертерном цехе

3.1 Ковшевая обработка чугуна

Ковшевая обработка чугуна производится на установке десульфурации чугуна (УДЧ), размещенной в кислородно-конвертерном цехе (рисунок 3.2).

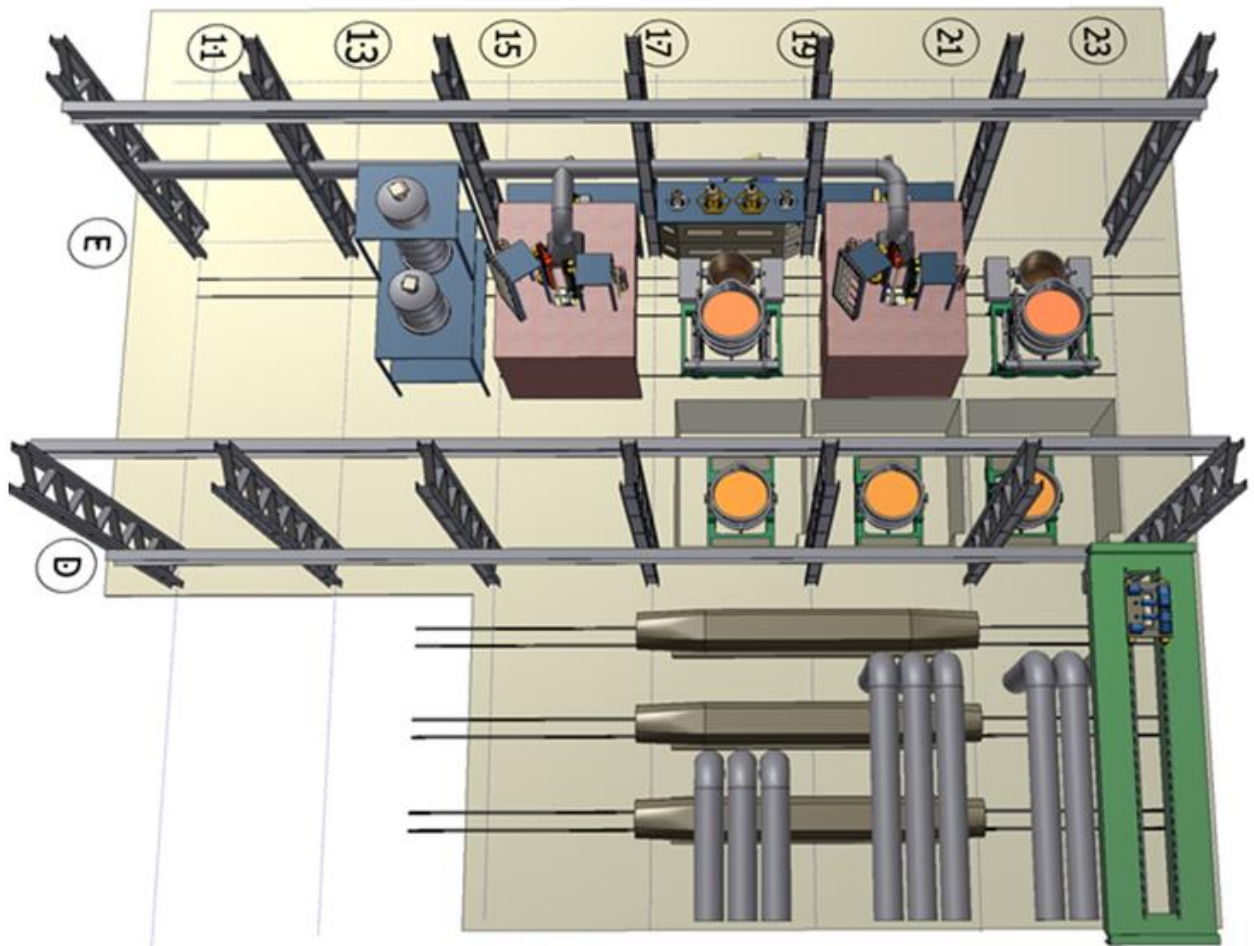


Рисунок 3.2 – Схема размещения УДЧ в кислородно-конвертерном цехе

На установке десульфурации чугуна осуществляются следующие технологические операции:

- обработка чугуна гранулированным магнием и флюидизированной известью или только флюидизированной известью с целью десульфурации;
- скачивание шлака из заливочного ковша;
- измерение температуры и отбор проб чугуна.

Техническая характеристика УДЧ представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Техническая характеристика УДЧ

Параметр	Значение
Годовая производительность установки, млн. т чугуна	3,0
Количество мест для обработки, шт.	1
Минимальное содержание серы в чугуне после обработки, %	0,002
Продолжительность обработки металла одного ковша, мин	30
Продолжительность продувки от исходного содержания серы 0,025 %, мин	15
Удельный расход вдуваемой флюидизированной извести, кг/т	1,81
Удельный расход вдуваемого магния, кг/т	0,48
Газ-носитель	азот

Установка десульфурации чугуна имеет одну позицию для обработки чугуна в одном ковше (рисунок 3.3).

Конструкция установки включает в себя следующие части, механизмы, узлы и системы:

- чугуновоз с кантователем, перемещающийся к позиции продувки с двух сторон площадки десульфурации;
- станция десульфурации;
- машина скачивания шлака;
- механизм подъема фурмы, устройство автоматического измерения температуры и взятия пробы чугуна, стеллаж хранения фурм, консольный кран для замены фурмы;

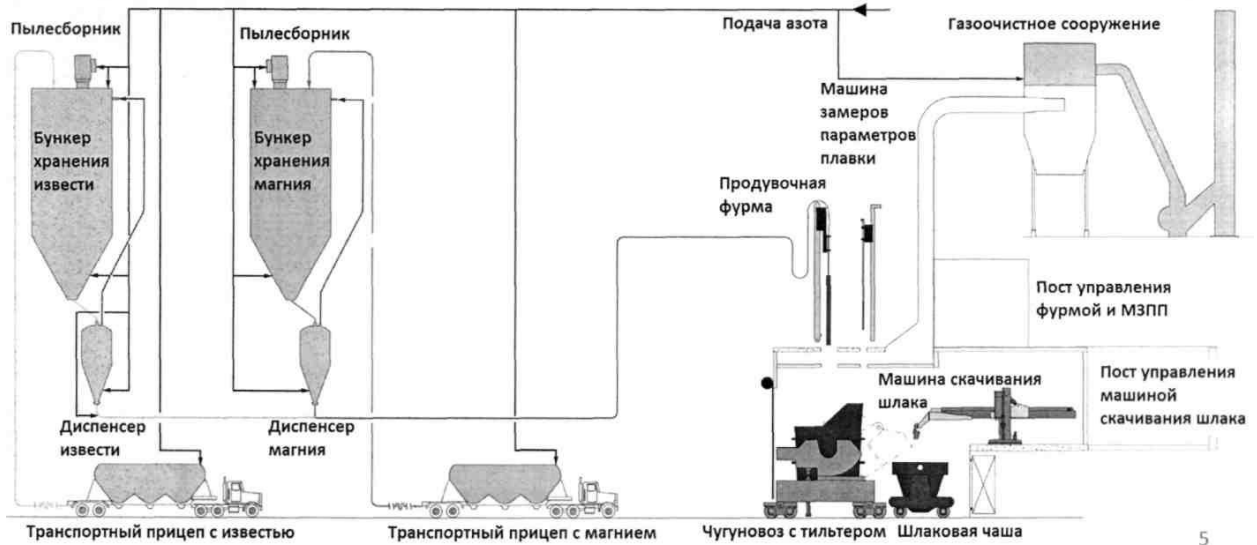


Рисунок 3.3 – Схема установки десульфурации чугуна

– каркас со встроенными помещениями пультов управления и электропомещением, трубопровод газоочистки; – комплекс приемных бункеров: два приемных бункера (бункеры хранения), станция (площадка) разгрузки, система газо– и материалопроводов;

– инжекционные бункера, расположенные под бункерами исходного материала и предназначенные для дозирования гранулированного магнезии и извести через фурму;

– продувочная фурма.

В загрузочный пролет ковши с чугуном вместимостью 320 т доставляются чугуновозом из участка перелива чугуна по траншее, откуда ковши заливочным краном передаются на установку десульфурации, где устанавливаются на один из чугуновозов УДЧ. В ковш с жидким чугуном опускается огнеупорная фурма, через которую в потоке азота вдувается смесь реагентов из флюидизированной извести и магнезии. На разгрузочную площадку флюидизированная известь и гранулированный магнезий доставляются в специальных грузовиках-цистернах, исключающих возможность взаимодействия извести с атмосферным воздухом, и оборудованных устройствами для выгруз-

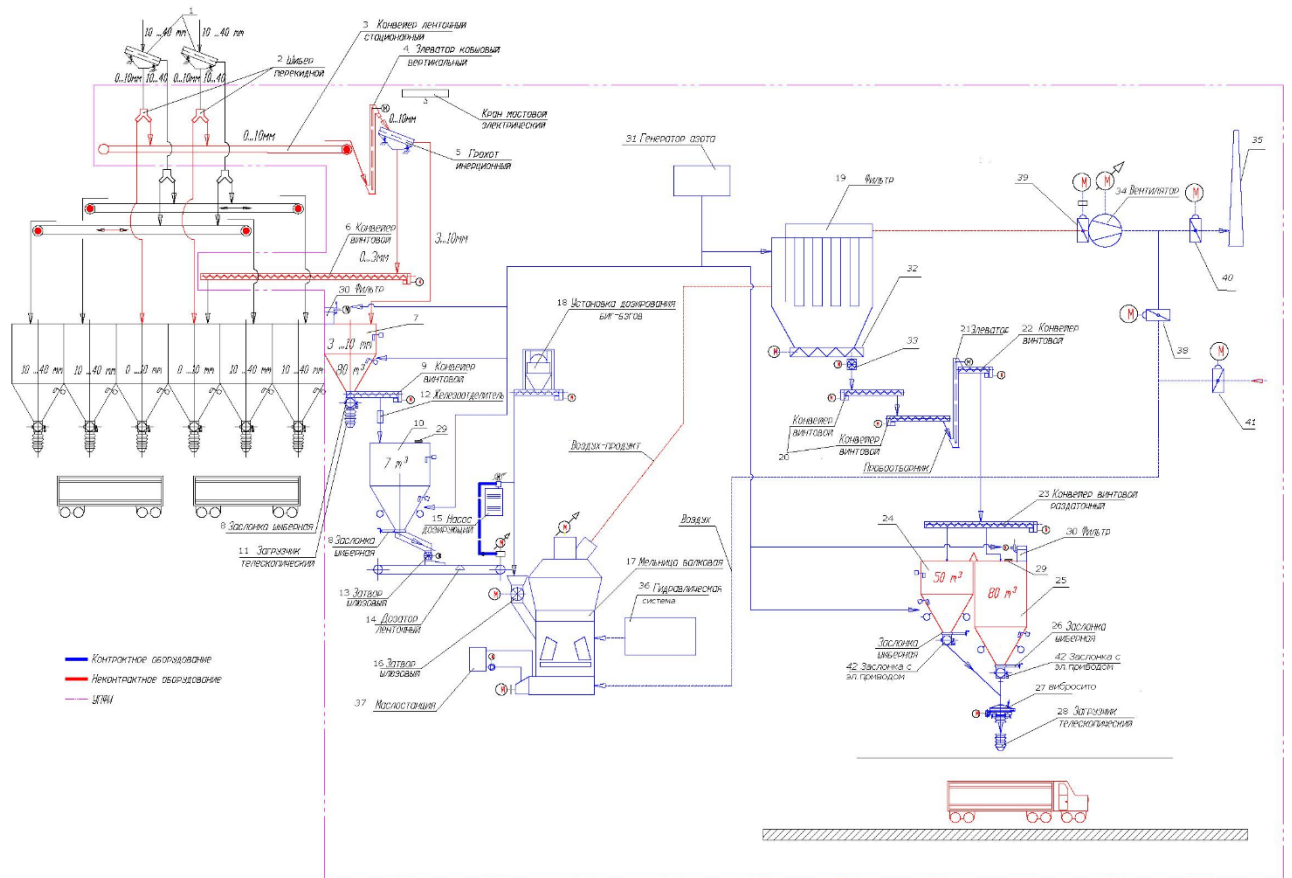
ки порошковых материалов с помощью транспортирующего газа-азота. В качестве рабочей смеси используются порошкообразный МГП-97 или КМ-190, а также флюидизированная известь производства ПАО «ММК».

Установка производства флюидизированной извести (УПФИ) фирмы «Almamet GmbH» (Германия) эксплуатируется в доломито-обжиговом цехе горно-обогательного производства ПАО «ММК» и имеет проектную производительность 6720 т/год (с возможностью увеличения до 12720 т/год). Технологическая схема производства флюидизированной извести приведена на рисунке 3.4.

В качестве исходного сырья используется известь с печей «Мерц», подготовка которой состоит в отделении извести фракции менее 3 мм, загрязненной посторонними включениями и предрасположенной к гидратации. Известь фракции от 0 до 10 мм после сортировки на грохотах (см. рисунок 3.4, позиция 1) посредством перекидных шиберов (2) в перегрузочных устройствах грохотов направляется на ленточный конвейер (3), далее – на элеватор ковшовый (4) и затем на грохот (5). После отсева известь фракции менее 3 мм посредством конвейера винтового (6) направляется в бункер готовой продукции для хранения извести фракции от 0 до 10 мм, известь фракции от 3 до 10 мм направляется по перегрузочному устройству в накопительный бункер (7) вместимостью 80 м³. Данный бункер оснащен клапаном избыточного давления, фильтром с автоматической системой очистки, шиберной заслонкой, датчиками максимального, минимального и предельного уровней, пневматическими вибраторами. Выгрузка извести из бункера может осуществляться посредством шиберной заслонки (8) двумя способами:

- винтовым конвейером (9) в расходный бункер извести вместимостью 7 м³ (10), который оснащен индикаторами минимального, максимального, предельного уровней и уровнемерами, клапаном избыточного давления;

- загрузочным телескопическим устройством (11) для разгрузки в железнодорожные вагоны (с последующей отгрузкой потребителям).

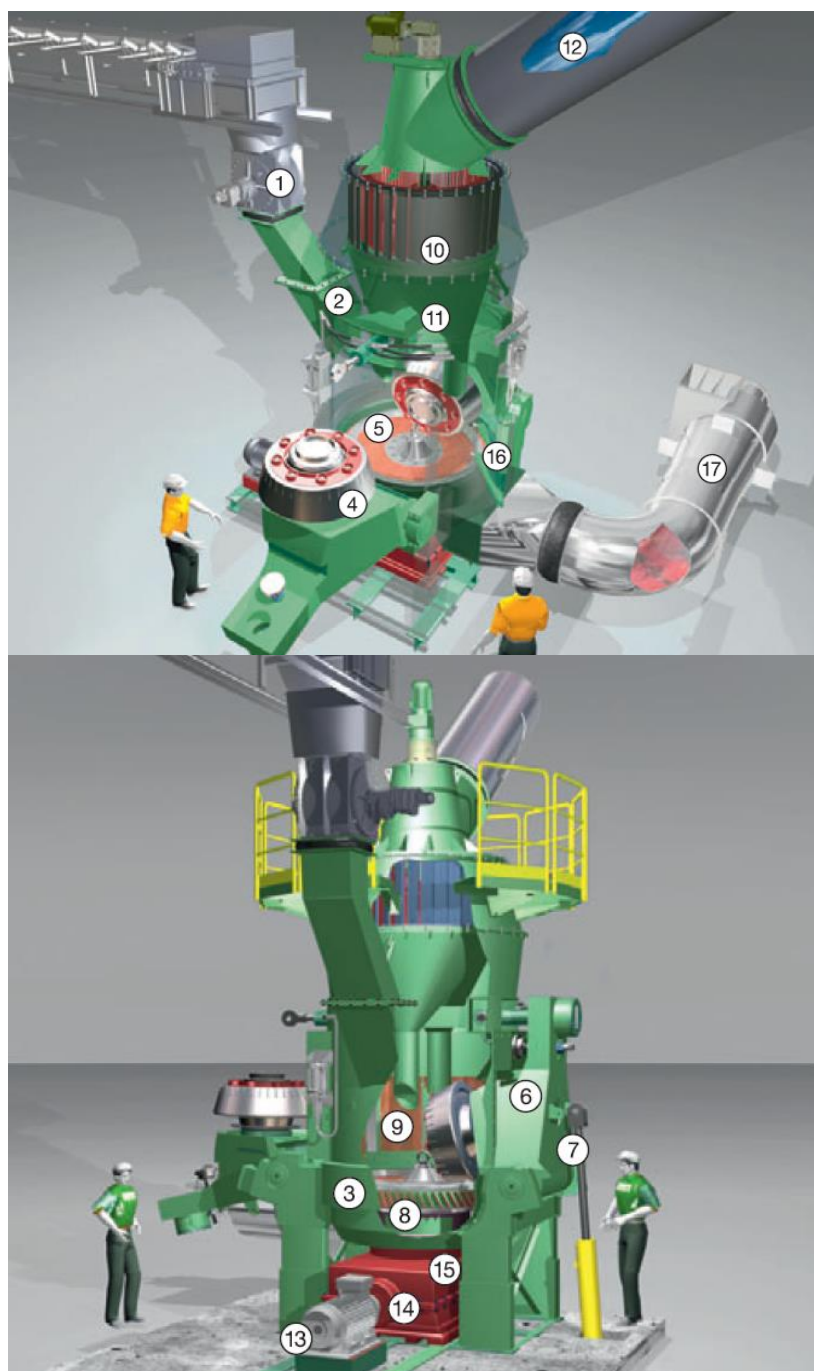


1 – грохота; 2 – шиббер; 3 – ленточный конвейер; 4 – элеватор ковшовый; 5 – грохот; 6 – конвейер винтовой; 7 – накопительный бункер; 8 – шиббер; 9 – конвейер винтовой; 10 – расходный бункер; 11 – загрузочное телескопическое устройство; 12 – магнитный железоотделитель; 13 – шлюзовый затвор; 14 – ленточный дозатор; 15 – дозирующие насосы; 16 – шлюзовый затвор; 17 – мельница; 18 – конвейер винтовой; 19 – рукавный фильтр; 20 – конвейер винтовой; 21 – ковшовый элеватор; 22 – конвейер винтовой; 23 – раздаточный конвейер; 24, 25 – накопительные бункера готовой продукции; 26 – шиббер; 27 – виброгрохот; 28 – загрузочное телескопическое устройство; 29 – клапан избыточного давления; 30 – фильтр с автоматической системой очистки; 31 – генератор азота; 32 – встроенный винтовой конвейер; 33 – лопастной питатель; 34 – вентилятор; 35 – дымовая труба; 36 – гидравлическая система; 37 – маслостанция; 39–41 – шиббера; 42 – заслонка

Рисунок 3.4 – Технологическая схема производства флюидизированной извести

В перегрузочном устройстве от винтового конвейера до расходного бункера установлен магнитный железоотделитель (12). Под расходным бункером установлен шлюзовый затвор (13), который подает известь на ленточный дозатор (14) и одновременно служит герметичным затвором. Поток извести на ленточном дозаторе обрабатывается флюидизатором, подаваемым одним из дозирующих насосов (15) в заданном количестве. В зимний период предусмотрена возможность подогрева флюидизатора с помощью специального устройства. В качестве поверхностно-активной добавки для придания текучести используется специальное силиконовое масло (основное вещество – полидиметилсилоксан). Удельный расход флюидизатора составляет от 0,8 до 1,2 кг/т при среднем значении 1,0 кг/т извести.

Двухвалковая мельница «Loesche» со всеми вспомогательными узлами представлена на рисунке 3.5. Перед запуском мельницы размольные валки приподнимаются над поверхностью размольного стола с помощью гидравлической системы. С ленточного дозатора исходная известь, обработанная флюидизатором, через шлюзовый затвор (рисунок 3.4, позиция 16; рисунок 3.5, позиция 1), который служит также герметичным затвором, попадает в центр размольного стола (рисунок 3.5, позиция 3). Под действием центробежной силы известь перемещается к краю размольного стола и таким образом оказывается под гидропневматически подпружиненными помольными валками (4). Вовлеченная известь в плотном слое измельчается в зазоре между валками и размольным столом. При накатывании на слой материала (5) валки приподнимаются. В связи с этим приходит в движение функциональный блок, включающий качающий рычаг (6), шток и поршень амортизационной системы. Измельченная размольными валками известь за счет центробежной силы, возникающей при вращении размольного стола, вытесняется за край стола. В зоне жалюзийного кольца (8), которое окружает размольный стол, направленный вверх поток горячего технологического газа (9) подхватывает смесь размолотой и недостаточно измельченной извести и транспор-



1 – шлюзовый затвор, 2 – перегрузочное устройство, 3 – размольный стол, 4 – валки, 5 – постель материала, 6 – качающий рычаг, 7 – амортизационная система, 8 – жалюзийное кольцо, 9 – поток технологического газа, 10 – сепаратор, 11 – внутренний корпус, 12 – технологический газ с готовым продуктом, 13 – электродвигатель, 14 – эластичная муфта, 15 – редуктор, 16 – кольцевой канал, 17 – генератор азота

Рисунок 3.5 – Вид двухвалковой мельницы

тирует его к сепаратору (10), расположенному в головной части мельницы. Сепаратор в соответствии с настройкой количества оборотов обеспечивает тонину помола извести и не пропускает крупно помолотые частицы. Они через внутренний корпус сепаратора (11) падают обратно на размольный стол для повторного помола.

Готовый продукт, крупностью менее 100 мкм, проходит через сепаратор мельницы и вместе с потоком технологического газа попадает на установку фильтрования – рукавный фильтр (рисунок 3.4, позиция 19), в котором измельченный материал осаждается на рукавах фильтра.

Для регулировки сброса технологического газа (40), подсоса атмосферного воздуха (41), производительности вентилятора (39) и для управления разрежением (38) перед мельницей используются шиберные заслонки. Смесь «воздух-продукт» поступает в корпус фильтра сбоку и отбойным листом распределяется по фильтровальным рукавам. Частицы извести удерживаются на наружной стороне надетых на каркасы фильтровальных рукавов. Очищенный газ внутри рукавов поступает через инжекторы в камеру очищенного газа. Во время фильтрации рукава втянуты вовнутрь в форме звезды. Очистка тканевых фильтровальных элементов производится в автоматическом режиме посредством импульсов азота. Частицы извести попадают в сборный бункер, откуда встроенным винтовым конвейером (рисунок 3.4, позиция 32; рисунок 3.5, позиция 7) и лопастным питателем (рисунок 3.4, позиция 33) транспортируются на винтовые конвейеры (20), попадают в ковшовый элеватор (21), далее – посредством винтового конвейера (22) на винтовой конвейер раздаточный (23) и в накопительные бункера готовой продукции вместимостью 50 и 80 м³ (24 и 25). В перегрузочном устройстве элеватора расположен шнековый пробоотборник для отбора проб флюидизированной извести.

Используемое оборудование и разработанная технология обеспечили высокое качество флюидизированной извести:

– относительное изменение массы при прокаливании (ОИМПП)

- составило 1,4% (при нормативе – не более 3,5 %);
- массовая доля гидратной воды – 0,5%;
- массовая доля оксидов кальция и магния – 98,0%;
- массовая доля фракции более 100 мкм – 3,2% (при нормативе – не более 4,0 %);
- текучесть (длина «ручья») – 0,8 м (при нормативе – не менее 0,5 м).

По расчетным данным суммарная площадь поверхности частиц флюидизированной извести диаметром 0,050 мм примерно в 500 раз больше площади поверхности куска извести диаметром 25 мм эквивалентного объема.

Технико-экономические показатели установки полностью соответствуют проектным показателям. На установке производится флюидизированная известь как для использования на установке десульфурации чугуна, так и для обработки стали на агрегате «печь-ковш».

После окончания обработки на УДЧ ковш с чугуном наклоняется и шлак с поверхности чугуна скачивается в шлаковую чашу машиной скребкового типа. Затем чугуновоз перемещается на позицию подъема ковша заливочным краном (имеется две позиции) и ковш отправляется к конвертеру.

С целью устранения дымовой пыли, образующейся в процессе скачивания шлака и десульфурации жидкого чугуна, установка снабжена собственной системой пылеулавливания, включающей вытяжной вентилятор, электродвигатель и импульсный рукавный фильтр с длинными рукавами низкого давления. Проектная мощность системы равна 260 тыс. м³/ч. Степень запыленности на выходе из системы составляет не более 20 мг/м³ при ее начальном значении 10 г/м³.

3.2 Выплавка стали в конвертере

Сталь выплавляется в одном из трех кислородных конвертеров (емкость 370 т с верхней продувкой кислородом) [116, 117], конструкция которого показана на рисунке 3.6 [118].

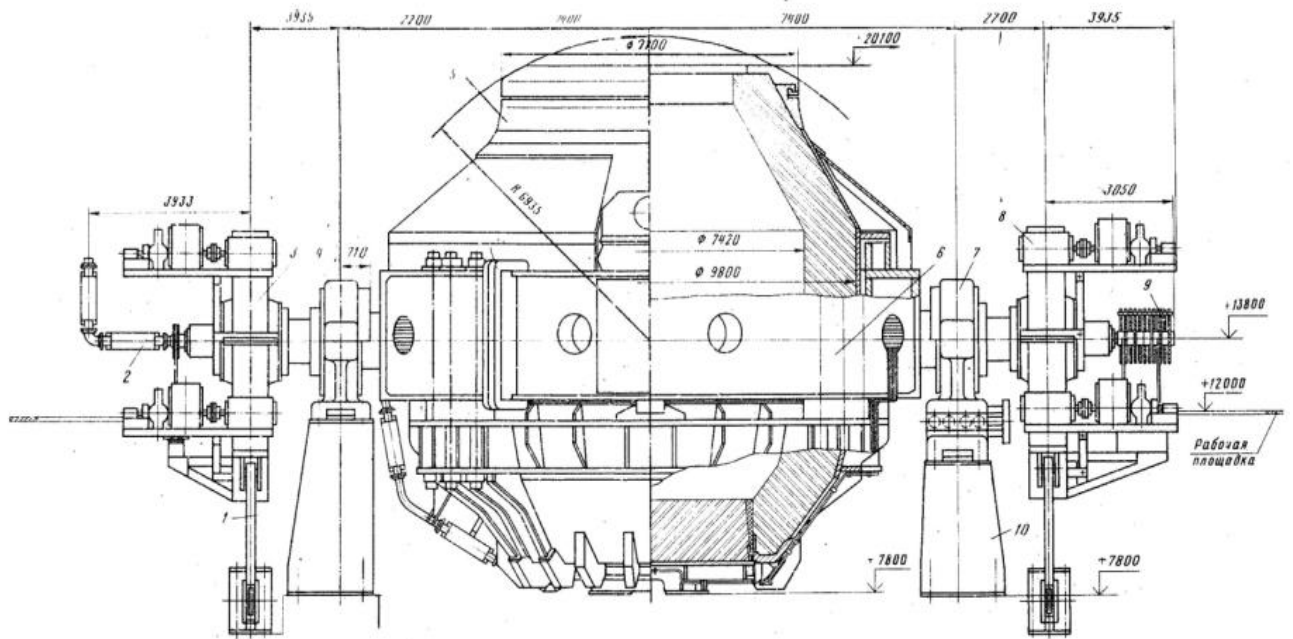


Рисунок 3.6 – Вид 370-т конвертера

Конвертер имеет периклазоуглеродистую футеровку с отъемным дном. Продувка кислородом сверху ведется через шестисопловую рабочую фурму с интенсивностью 1100–1500 м³/мин. Выплавка стали в конвертере включает в себя следующие основные технологические операции:

- завалка лома из двух совков вместимостью по 65 м³, загрузка части извести;
- заливка чугуна из 320-т ковша;
- продувка кислородом, в начале продувки загрузка шлакообразующих материалов;
- отбор проб металла и шлака, замер температуры металла;
- выпуск металла, раскисление-легирование металла в ковше, введение твердой шлакообразующей смеси в ковш;
- нанесение гарнисажа на футеровку конвертера;
- слив шлака;
- осмотр футеровки и подготовка к следующей плавке.

Продолжительность плавки составляет 35–40 мин.

3.3 Ковшевая обработка стали на АКП

Ковшевая обработка стали осуществляется на агрегатах «ковш-печь» (АКП) [119, 120]. Трубная сталь обрабатывается на двухпозиционном АКП №2 фирмы «SMS MEVAC», принципиальная схема которого приведена на рисунке 3.7.

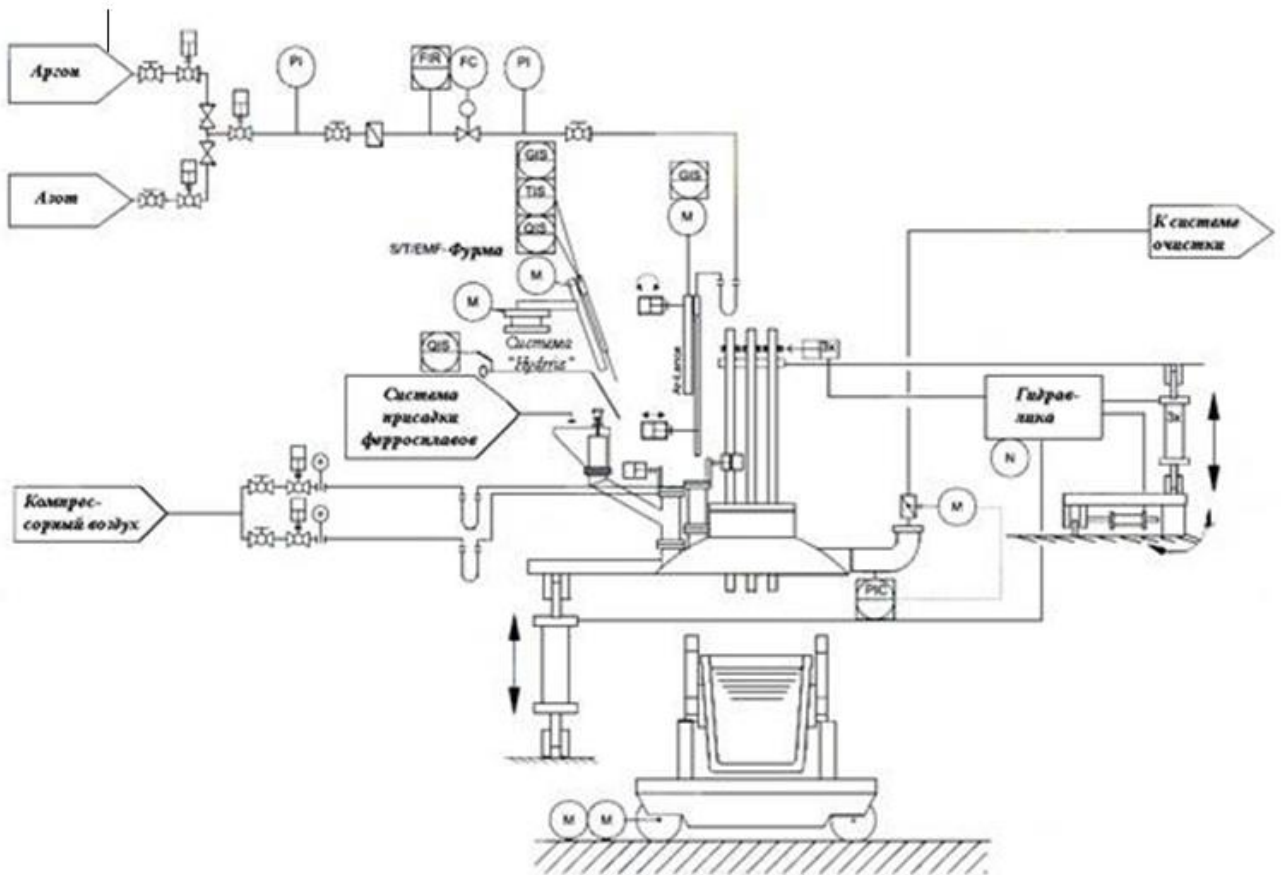


Рисунок 3.7 – Принципиальная схема агрегата «ковш-печь» №2

АКП включает следующие машины, отдельные узлы и системы:

- каркас агрегата со встроенными помещениями и постом управления;
- система хранения, дозирования и механизированной подачи кусковых ферросплавов и шлакообразующих материалов;
- тракт подачи кусковых ферросплавов и шлакообразующих материалов;
- по одному четырехручьевому трайб-аппарату на каждой позиции

- нагрева, предназначенных для ввода в металл алюминиевой и порошковой проволоки с различными видами наполнителей;
- две водоохлаждаемые крышки сводов;
 - механизмы подъема водоохлаждаемых крышек;
 - поворотный электродный портал с графитовыми электродами;
 - помещение трансформатора и трансформатор;
 - система высокого тока (для передачи электроэнергии от трансформатора к электродам);
 - автоматические соединительные муфты для автоматического подсоединения линии подачи инертного газа к ковшу;
 - системы для донной продувки на каждой позиции нагрева;
 - на каждой позиции нагрева по одной верхней продувочной фурме и механизму ее перемещения, предназначенных для перемешивания металла аргоном и для вдувания порошкообразных материалов при продувке металла с целью глубокой десульфурации;
 - два бункера для хранения порошкообразных материалов;
 - два пневмокамерных насоса для вдувания порошков;
 - конвейерная линия для подачи порошков;
 - манипулятор для измерения температуры и отбора проб металла (на каждой позиции обработки);
 - стенд наращивания электродов;
 - система добавления изоляционного материала;
 - два сталевоза.

К комплексу АКП–2 относится система удаления шлака, оборудованная стендом для наклона сталеразливочного ковша, машиной для скачивания шлака и пылеулавливающего колпака для отвода образующихся газов.

Агрегат имеет две позиции обработки, то есть один трансформатор обслуживает два стенда, на которых одновременно могут обрабатываться два ковша с металлом, но нагрев производится поочередно (то на одном, то на

другом). Такой режим работы повышает производительность агрегата.

На рисунке 3.8 показан электродный портал в рабочем положении.



Рисунок 3.8 – Электродный портал двухпозиционного агрегата «ковш-печь» в рабочем положении

Техническая характеристика АКП №2 приведена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Техническая характеристика агрегата «ковш-печь» №2

Показатель	Значение
Мощность трансформатора, МВА	56
Диаметр распада электродов, мм	900±25
Диаметр электродов, мм	508
Количество ступеней регулирования, шт.	10
Скорость нагрева металла, °С/мин	до 5

Перед обработкой кран устанавливает ковш на одну из передаточных тележек ковша, при этом линии подачи инертного газа автоматически подсоединяются к ковшу с помощью автоматических соединительных муфт. Перед тем, как каждая тележка переместится в свою позицию обработки, оператор с местной панели управления включает подачу инертного газа. Наблюдая за поверхностью расплава, оператор может проверить исправность работы системы продувки инертным газом.

В ходе обработки через различные отверстия в каждой из крышек ковша можно выполнять процедуры замера и отбора проб, ввод проволоки, а также перемешивание инертного газа посредством донных пробок и с помощью фурм. Кроме того, каждая крышка имеет рабочее окно с пневматическим приводом. Это окно позволяет наблюдать за поверхностью стали, вручную измерять температуру и выполнять отбор проб, а также вручную добавлять легирующие элементы.

Дымовой колпак сверху крышки собирает дымовые газы, образующиеся при обработке, и отводит их в общую пылесборную систему через водоохлаждаемый дымоход. С помощью датчика давления и заслонки отходящих газов регулируется поток отходящих газов каждой крышки, чтобы свести к минимуму поступление наружного воздуха.

Для надежной работы агрегата важное значение имеет стабильное горение электрической дуги. Поэтому расстояние между концами электродов и поверхностью металлической ванны точно контролируется. Электроды поднимаются и опускаются по отдельности с помощью гидроцилиндров позиционирования электродов.

При необходимости возможно скачивание шлака из ковша после выпуска на станции скачивания шлака. Станция удаления шлака оборудована стойкой для наклона ковша с гидравлическим приводом и машиной для удаления шлака.

Легирующие элементы и флюсы поступают из системы хранения и добавки легирующих элементов на позиции обработки с помощью вибропитателей и ленточных конвейеров. В бункерах промежуточного хранения хранятся порции легирующих элементов до их загрузки в ковш.

Ввод различных типов проволоки в ковш осуществляется посредством 4-ручьевых трайб-аппаратов. Возможен одновременный ввод проволоки из двух ручьев. Через систему направляющих трубок и механизм перемещения направляющих трубок проволока подается в зону непосредственно у поверхности расплава, чтобы обеспечить ее плавный ввод.

На АКП №2 могут осуществляться следующие технологические операции:

- продувка металла аргоном, подаваемом через пористые пробки, установленные в днище сталеразливочного ковша, с целью усреднения химического состава и температуры металла по объему сталеразливочного ковша и с целью интенсификации процесса десульфурации металла основным шлаком;
- продувка металла аргоном, подаваемом через верхнюю продувочную фурму, с целью интенсификации процесса десульфурации металла основным шлаком, или с целью усреднения химического состава и температуры металла по объему сталеразливочного ковша при отсутствии или слабом перемешивании металла аргоном, подаваемом через донные пробки;
- совместная продувка металла аргоном, подаваемом через верхнюю продувочную фурму и через пористые донные пробки при отсутствии или слабом перемешивании металла аргоном, подаваемом через пористые пробки или с целью интенсификации процесса десульфурации металла основным шлаком;
- коррекция химического состава металла и (или) его микролегирование присадкой кусковых материалов;
- коррекция химического состава металла по содержанию алюминия путем ввода алюминиевой катанки, присадкой чушкового или брикетирован-

ного алюминия или вводом алюминиевой дроби;

- коррекция химического состава металла, его микролегирование и (или) получение металла с узкими пределами содержания элементов путем ввода порошковой проволоки с различными видами наполнителей;

- нагрев металла электрическими дугами;

- охлаждение металла;

- десульфурация металла основным шлаком;

- глубокая десульфурация металла путем вдувания порошкообразных материалов через верхнюю продувочную фурму;

- измерение температуры, окисленности металла, а также содержания в металле водорода;

- отбор проб металла и шлака;

- отправка пневпочтой проб металла и шлака на экспресс-анализ в лабораторию аналитического контроля или в контейнерной лаборатории;

- добавление изоляционного материала на поверхность расплава с целью снижения тепловых потерь и предотвращения контакта металла с воздухом.

На установке удаления шлака производится скачивание шлака с поверхности сталеразливочного ковша.

На АКП возможны следующие варианты десульфурации металла:

- десульфурация стали специально подготовленным «белым» шлаком;

- глубокая десульфурация стали при вдувании флюидизированной извести.

Для успешного проведения процесса десульфурации металла по первому варианту необходимо раскислить поверхностный слой шлака присадкой алюминиевой дроби в количестве 150–250 кг. В случае отсутствия дроби возможно использование чушкового или прессованного (брикетированного) алюминия. При продувке металла аргоном необходимо обеспечить полное растворение алюминия в шлаке для снижения его окисленности.

Далее производится электродуговой нагрев металла, во время которого осуществляется наведение высокоосновного шлака присадкой в ковш твердой шлакообразующей смеси (ТШС), состоящей из извести и плавикового шпата в соотношении 4:1. Шлакообразующие материалы присаживаются разовыми порциями не более 500 кг. Следует учитывать, что присадка ТШС массой 1 т снижает температуру металла на 7–9 °С. Электродуговой нагрев должен обеспечить полное растворение шлакообразующих материалов и получение жидкоподвижного рафинировочного шлака. «Белый» шлак характеризуется высокой основностью, равной 3,7–4,5, и низкой окисленностью – суммарное содержание оксидов железа и марганца должно быть не более одного процента. При обработке таким шлаком можно достичь коэффициента распределения серы 150–200.

После наведения шлака устанавливается максимально-возможный расход аргона на донные пробки, исключаящий выплески металла и шлака из ковша. Для интенсификации перемешивания металла и шлака можно производить совместную продувку металла аргоном с использованием верхней продувочной фурмы и донных пробок. Продолжительность продувки после наведения шлака должна составлять не менее 5 минут.

Для глубокой десульфурации металла АКП оборудован системой для вдувания порошкообразных материалов в потоке транспортирующего газаносителя, в качестве которого используется аргон. Через систему можно вдувать порошкообразные материалы (флюидизированную известь, силикокальций) через верхнюю фурму.

Схема инъекционной установки АКП №2 для вдувания порошкообразных материалов приведена на рисунке 3.9.

Флюидизированная известь из специальных накопительных бункеров по газопроводящему тракту и через верхнюю фурму начинает подаваться в ковш в момент наведения шлака. Давление в инжекторе должно составлять не менее 1 МПа. Одновременно должна производиться качественная продув-

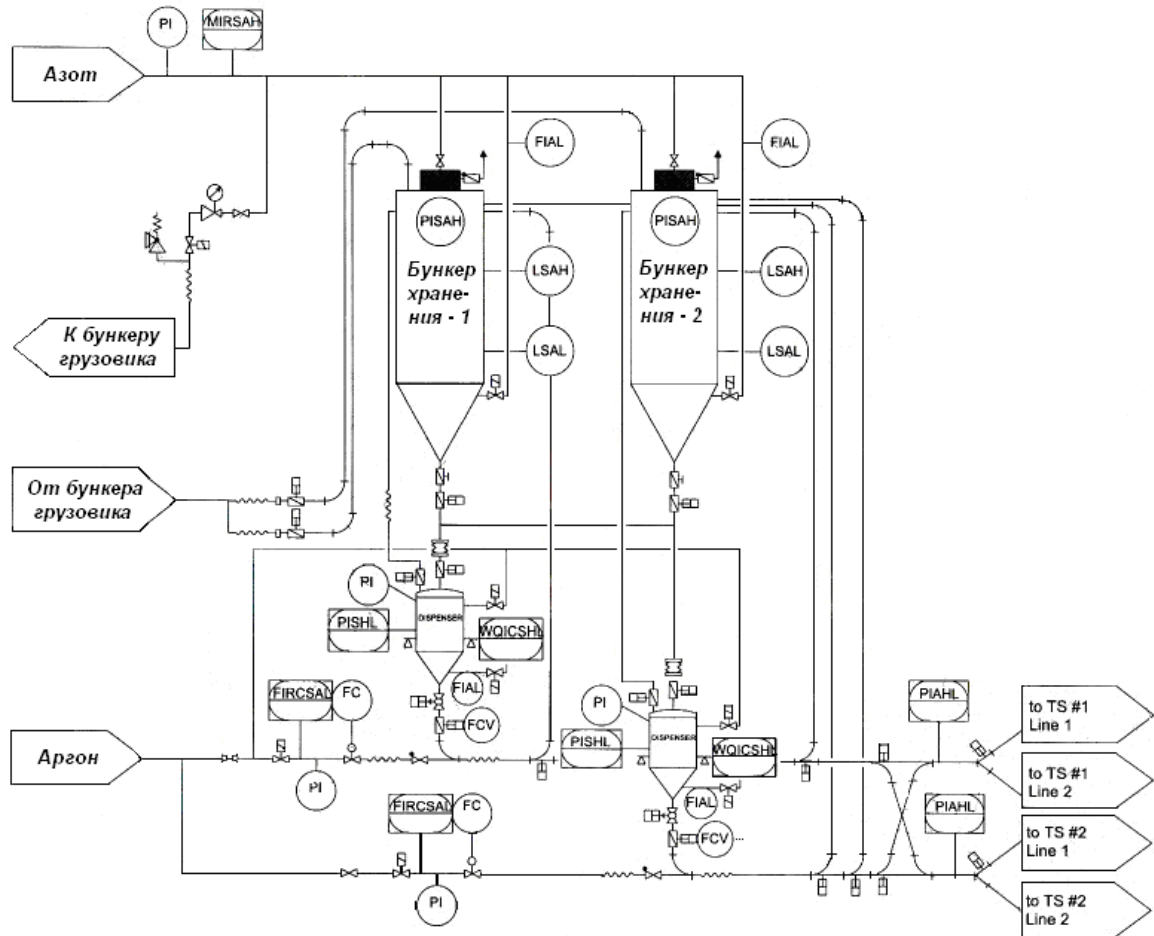


Рисунок 3.9 – Схема инжекционной установки АКП №2

ка металла аргоном через днище ковша для лучшего перемешивания расплава. Для десульфурации предусматривается емкость с порошкообразными материалами и система вдувания, которая состоит из:

- бункера;
- инжекторного распылителя;
- конвейерной линии.

Продувочная фурма (рисунок 3.10) состоит из верхней и нижней трубок.

Уровень шлака в ковше при обработке металла рафинирующими порошкообразными реагентами должно быть ниже верхней кромки ковша на величину не менее 500 мм (обеспечивается шихтовкой плавки).

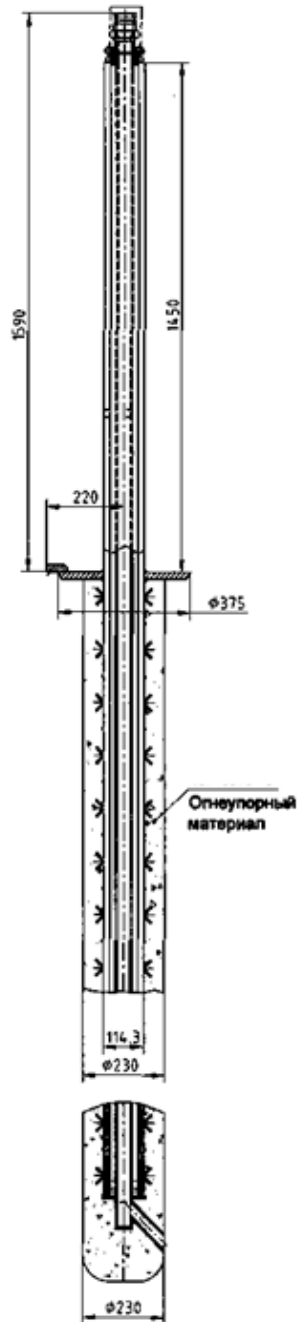


Рисунок 3.10 – Фурма для вдувания порошкообразных материалов

При продувке металла силикокальцием, необходимо учитывать, что введение 1 кг силикокальция на тонну стали повышает массовую долю кремния в металле на 0,06 %. Снижение температуры металла при обработке рафинирующими порошкообразными реагентами составляет 2...4 °С за минуту продувки.

3.4 Вакуумирование стали

Вакуумная обработка стали осуществляется на установках вакуумирования стали (УВС). Трубная сталь обрабатывается на двухпозиционной УВС №2 циркуляционного типа (рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 – Вид патрубков УВС №2
после окончания обработки металла

УВС имеет две вакуумные камеры на двух позициях при одном вакуумном насосе с передвижным газоходом, что позволяет оперативно производить замену днища вакуумной камеры и исключить простои оборудования.

Техническая характеристика вакуумной камеры:

объем, м ³	40
масса футеровки, т	76
масса (без футеровки), т	28.

Система подачи аргона в патрубок вакуумной камеры состоит из двух колец, в каждом из которых расположено по восемь фурм диаметром 3 мм с индивидуальной системой регулирования.

Вакуумный парожетторный насосный агрегат (ВПНА) предназначен для создания разрежения в вакуумной камере и представляет собой пятиступенчатую систему вакуумных ступеней, пять паровых эжекторов и три водокольцевых насоса.

Техническая характеристика ВПНА:

– производительность агрегата по сухому воздуху при температуре 20 °С с давлением на входе в агрегат 66,6 Па (0,5 мм рт.ст.), кг/ч	не менее 800
– минимальное разрежение в вакуумной камере, Па	66,6
– максимальный расход рабочего пара, т/ч	50
– максимальный расход охлаждающей воды, м ³ /ч	1700
– давление рабочего пара на входе в эжекторы, МПа	1,1.

Система хранения, взвешивания и дозирования ферросплавов включает в себя следующее оборудование:

бункеры объемом 20 м ³ , шт.	6
бункеры объемом 10 м ³ , шт.	6.

Вакуумный шлюз, предназначенный для приемки и подачи материалов в вакуумную камеру в процессе обработки, состоит из приемной воронки и шлюзовой камеры объемом 0,7 м³.

Нагрев вакуумной камеры осуществляется при помощи газокислородной фурмы:

температура нагрева футеровки, °С	не менее 900
расход кислорода, м ³ /ч	до 645
расход природного газа, м ³ /ч	до 300
давление газа, МПа	не менее 0,3.

Газоохладитель предназначен для охлаждения удаляемых из вакуумной камеры газов с целью уменьшения их объема и предохранения шарнирных соединений вакуумпроводов от воздействия высоких температур.

Шарнирный вакуумпровод служит для герметичного подвижного соединения вакуумной системы, смонтированной на подвижной площадке вакууматора, со стационарно установленным вакуумным затвором.

На УВС могут осуществляться следующие технологические операции:

- вакуумная дегазация металла (удаление растворенных в металле водорода и азота);
- вакуумное обезуглероживание металла;
- принудительное вакуумное обезуглероживание металла с вдуванием кислорода;
- коррекция химического состава металла и микролегирование присадкой кусковых материалов;
- измерение содержания кислорода в металле, раскисление и коррекция химического состава металла по содержанию алюминия;
- измерение температуры металла, отбор проб металла и шлака.

3.5 Слябовая МНЛЗ

Трубная сталь разливается на слябовой МНЛЗ №6 фирмы «SMS-Deag» [121, 122], имеющей следующую техническую характеристику:

Тип МНЛЗ	Криволинейная с вертикальным участком
Количество ручьев, <u>шт.</u>	1
Годовая проектная производительность, млн. т слябов	1,65
Размеры отливаемых слябов, мм:	
толщина	190, 250, 300, 350

ширина	1400–2700
длина	4100–12000 или 2500–4100
Металлургическая длина машины, м	34,2
Длина вертикального участка, м	около 2,7
Базовый радиус кривизны машины, м	11
Максимальная скорость вытягивания (по механизмам), м/мин	2,5
<u>Вместимость сталеразливочного ковша, т</u>	370
Вместимость промежуточного ковша, т	50
Высота медных стенок кристаллизатора, мм	900
Частота качаний кристаллизатора, <u>кач./мин</u>	до 300
Амплитуда качания кристаллизатора, мм	до 3,5
Количество сегментов в ЗВО, шт.	15
Отметка разливочной площадки, м	около 13,8

Схема технологического канала машины представлена на рисунке 3.12.

Несомненными достоинствами машины являются наличие достаточно протяженного вертикального участка и большой базовый радиус изгиба технологического канала. На вертикальном участке технологического канала МНЛЗ из лунки жидкого металла отливаемого сляба неметаллические включения беспрепятственно всплывают и поглощаются покровным шлаком в кристаллизаторе МНЛЗ, что снижает загрязненность металла включениями. При большом радиусе изгиба канала машины затвердевшая оболочка отливомой заготовки подвергается меньшим деформационным напряжениям в процессе ее загибания и разгибания, что снижает степень развития различных дефектов и улучшает качество сляба.

МНЛЗ оснащена оборудованием, позволяющем производить мягкое обжатие сляба на участке технологического канала от шестого по пятнадцатый сегменты зоны вторичного охлаждения (ЗВО).

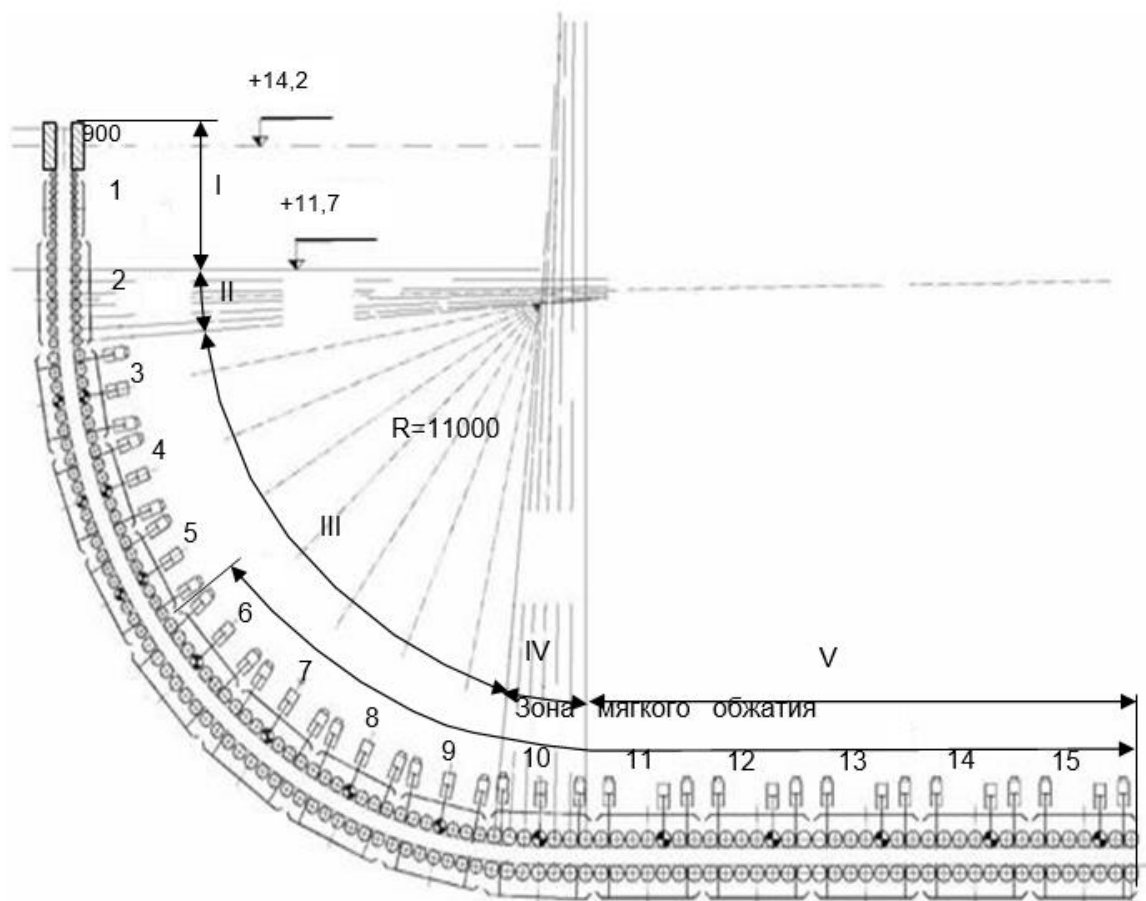


Рисунок 3.12 – Схема технологического канала одноручьевой слябовой МНЛЗ №6 ККЦ ПАО «ММК»: 1...15 – сегменты ЗВО; I – вертикальный участок; II – участок загиба; III – дуговой участок; IV – участок разгиба; V – горизонтальный участок

По рекомендации фирмы-изготовителя оборудования осуществлять обжатие заготовки следует на горизонтальном участке машины, а именно – в 11–15 сегментах. В каждом из этих сегментов имеется по семь роликов диаметром 320 мм. Расстояние между осями соседних роликов равно 355 мм, поэтому длина одного сегмента – расстояние от оси первого до оси последнего ролика, составляет 2130 мм. Каждый сегмент оснащен четырьмя гидроцилиндрами, обеспечивающими позиционирование сегмента путем задания установок растворов роликов. Значение изменения раствора роликов контролируется датчиками перемещения в соответствии с ходом штока гидроцилиндра. Величина хода штока и величина обжатия заготовки в действитель-

ности не эквивалентны друг другу из-за прогибания верхней рамы сегмента. Поэтому фактическая величина обжата заготовки несколько меньше, чем ход штока гидроцилиндров.

Место приложения мягкого обжата на технологическом канале МНЛЗ может выбираться на двух различных уровнях автоматизированной системы МНЛЗ.

Первый уровень автоматизированной системы предполагает ввод в математическую модель информации о значении коэффициента затвердевания, производится расчет толщины слоя затвердевшего металла и протяженности лунки жидкого металла для выбора места приложения обжата к заготовке.

На втором основном уровне автоматизированной системы математическая модель DSC системы динамического охлаждения непрерывнолитой заготовки в режиме реального времени рассчитывает положение изотерм ликвидуса и солидуса в отливаемой заготовке. При этом используется информация о значениях следующих параметров: температуры разливаемого металла в промежуточном ковше, содержания химических элементов в стали, размеров поперечного сечения отливаемой заготовки, температуры воды на охлаждение заготовки в ЗВО, температуры поверхности сляба по центру широкой грани на выходе из МНЛЗ, измеряемой при помощи пирометра.

По рекомендациям фирмы место технологического канала МНЛЗ для осуществления мягкого обжата заготовки выбирается по схеме, приведенной на рисунке 3.13.

По расчетным данным определяется номер сегмента зоны вторичного охлаждения, в котором заканчивается затвердевание металла. Расчетная длина лунки жидкого металла не должна превышать расстояние от зеркала металла в кристаллизаторе до оси первого ролика этого условного J-го сегмента. Тогда мягкое обжатие сляба рекомендуется производить в предыдущих, одном (J-1), двух (J-1, J-2) или трех (J-1, J-2 и J-3) сегментах горизонтального участка МНЛЗ. Основным вариантом считается двухсегментное обжатие.

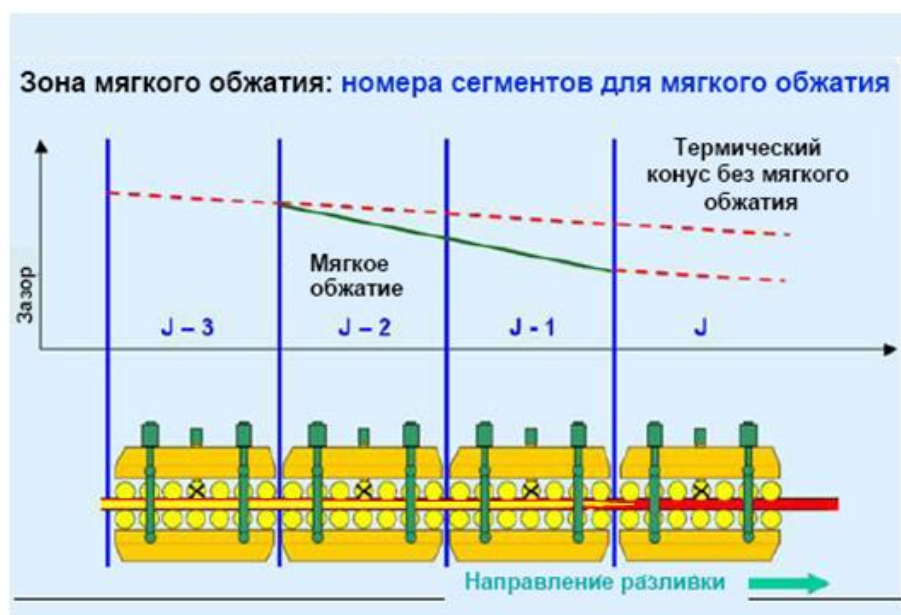


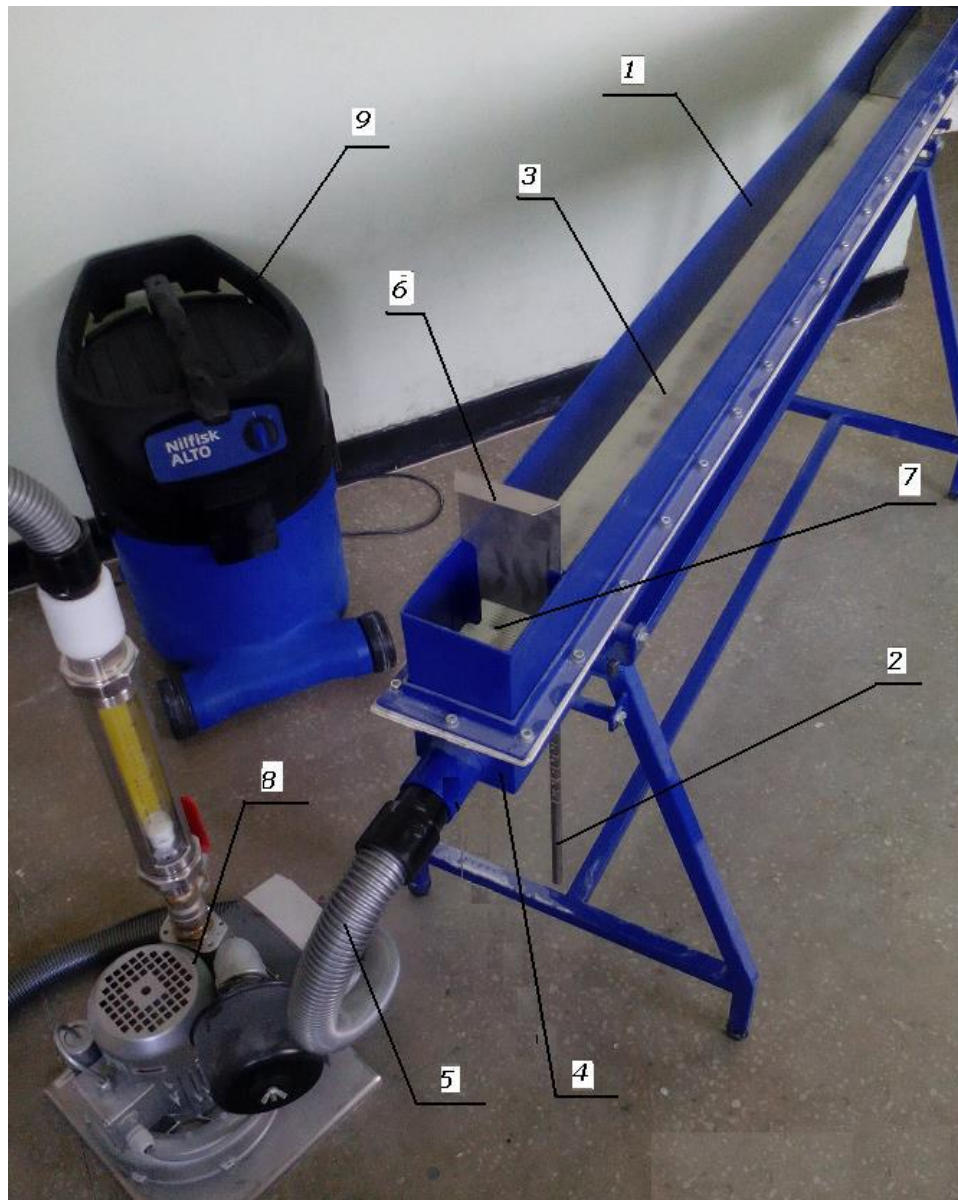
Рисунок 3.13 – Схема выбора сегментов для осуществле.....
 мягкого обжата сляба в двух роликовых
 сегментах по основному варианту обжата

Интенсивность обжата в выбранных сегментах может изменяться в диапазоне от 0,6 до 1,3 мм/м в зависимости от химического состава разливаемой стали и выбранного режима вторичного охлаждения.

3.6 Методики исследований

Метод определения текучести флюидизированной извести

Установка для определения текучести флюидизированной извести по длине образующегося «ручья» при истечении по желобу представлена на рисунке 3.14.



1 – желоб, 2 – шток с градуировкой, 3 – фильтровальная ткань,
 4 – компрессор, 5 – сжатый воздух, 6 – торец желоба, 7 – шибер, 8 - отсек;
 9 - промышленный пылесос

Рисунок 3.14 – Установка для определения текучести
 флюидизированной извести

Установка имеет следующие элементы:

– наклонный желоб (рисунок 3.14, позиция 1) длиной 1,5 м и шириной 0,1 м; угол наклона выставляется по штоку с градуировкой (2); по вы-

соте желоб разделен на две части фильтровальной тканью (3); в нижнюю часть желоба, под фильтровальную ткань, с торца (4) через шланг (5) подается воздух; с этого же торца, в верхней части желоба установлен шибер (6), образующий в желобе отсек (7);

- компрессор (8) для подачи воздуха;
- промышленный пылесос (9).

Для проведения испытаний необходимо:

- поместить взвешенную на весах пробу извести массой 300 г в емкость вместимостью 2000 мл с плотно притертой крышкой;
- встряхнуть пробу в емкости не менее 30 раз с частотой не менее 30 раз в минуту и амплитудой не менее 20 см;
- проверить выставленный угол наклона желоба (рекомендуемое значение 2 градуса);
- включить компрессор (рекомендуемое значение расхода воздуха от 25 до 30 м³/ч);
- закрыть шибер;
- пробу поместить в образовавшийся отсек;
- резко открыть шибер; проба извести при этом перемещается – «стекает» вниз по желобу; текучесть извести определяется по длине образующегося «ручья», измеряемой линейкой; длина «ручья» должна составлять не менее 0,5 м;
- после каждого испытания необходимо проводить очистку фильтровальной ткани посредством промышленного пылесоса (9).

Результаты измерений вычисляются как среднее арифметическое значение трех испытаний.

Методика определения гранулометрического и химического состава
флюидизированной извести

Для определения гранулометрического состава флюидизированной извести фирмой «Almamet GmbH» поставлен воздушоструйный ситовой аппарат «Hosokawa Alpine e200 LS Basic», представленный на рисунке 3.15. Образцы извести массой от 0,3 до 100 г рассеиваются в струе воздуха.



Рисунок 3.15 – Воздушоструйный ситовой аппарат
«Hosokawa Alpine e200 LS Basi2»

Для определения содержания оксидов кальция, магния и примесей в извести используется энергодисперсионный рентгеновский спектрометр «SPECTROXEPOS», представленный на рисунке 3.16.



Рисунок 3.16 - Энергодисперсионный рентгеновский
спектрометр «SPECTROXEPOS»

Методика определения химического состава металла и шлака

Химический состав проб металла определялся по стандартным методикам с использованием эмиссионного спектрометра SPECTROLAB M8A и анализатора ТС–436 фирмы «LECO» (США).

Содержание растворенного в металле водорода измерялось по стандартной методике на анализаторе «Hydris Net» (Германия).

Химический состав проб шлака определялся по стандартным методикам с использованием спектрометров рентгеновских многоканальных типа ARL 8680S XRF и ARL 8660S XRF, спектрометра рентгенофлуоресцентного ARL 9900 (все – фирмы «ARL», Швейцария).

Выводы по третьей главе

1 Базовая технология производства трубной стали в ККЦ ПАО «ММК» осуществляется по схеме: ковшевая обработка чугуна–выплавка полупродукта в конвертере–ковшевая обработка стали на агрегате «ковш-печь»–вакуумирование стали–непрерывная разливка стали на МНЛЗ. Рассмотрены основное оборудование и технология производства.

2 Десульфурация металла осуществляется в несколько стадий:

– На установке десульфурации чугуна в расплав потоком азота инжектируется смесь из флюидизированной извести и магнезия.

– В процессе выпуска полупродукта из конвертера в ковш вводится твердая шлакообразующая смесь из извести и плавикового шпата.

– На агрегате «ковш-печь» обработка проводится сначала под «белым» шлаком, а затем путем вдувания аргоном флюидизированной извести.

3 Рассмотрены методики определения текучести и состава флюидизированной извести, химического состава металла и шлака.

**ГЛАВА 4 ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
УЛЬТРАНИЗКОСЕРНИСТОЙ СТАЛИ МАРКИ
DNV SAWL 485 FD**

4.1 Десульфурация чугуна

В работе проанализирован массив производственных данных из 89 плавков с обработкой чугуна (таблица 4.1) [123–126].

Таблица 4.1 – Усредненные данные обработки чугуна

Параметр	Значение
Количество обработанных ковшей чугуна, шт.	89
Масса чугуна в ковше, т	318
Продолжительность продувки азотом, мин	15
Масса вдуваемых материалов, кг (кг/т): - флюидизированная известь - магний	596 (1,9) 127 (0,4)
Температура чугуна, °С: - до обработки - после обработки	1368 1363
Содержание серы в чугуне, %: - до обработки - после обработки	0,022 0,005
Степень десульфурации чугуна, %	77,3

Степень десульфурации чугуна изменялась в диапазоне от 50 до 87,5 %. При корреляционно-регрессионном анализе производственных данных установлены статистически значимые линейные зависимости степени десульфурации чугуна от продолжительности вдувания материалов азотом,

суммарной массы флюидизированной извести и магния, отношения массы флюидизированной извести к массе магния (рисунки 4.1–4.3).

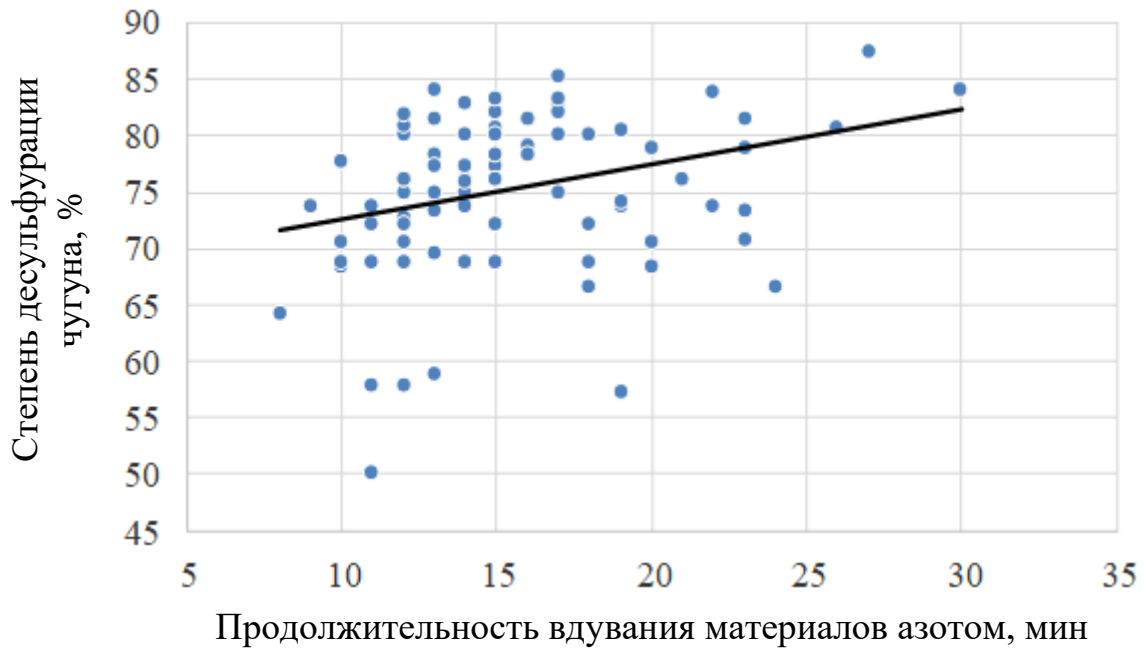


Рисунок 4.1 – Зависимость степени десульфурации чугуна ($\eta_{\text{ч}}$) от продолжительности вдувания материалов азотом ($\tau_{\text{вд}}$):

$$\eta_{\text{ч}} = 0,489 \cdot \tau_{\text{вд}} + 67,66, \quad r = 0,302, \quad r_{0,01} = 0,272 \quad (4.1)$$

С увеличением продолжительности продувки азотом от 8 до 30 мин и суммарной массы вдуваемых реагентов от 295 до 1210 кг степень десульфурации чугуна линейно возрастает. Сравнение абсолютных значений коэффициентов парной корреляции полученных зависимостей показывает, что наиболее сильное влияние на процесс десульфурации чугуна оказало отношение массы флюидизированной извести к массе магния во вдуваемой смеси. С уменьшением этого отношения от 6,5 до 3,8 эффективность обработки растет, что свидетельствует о более высокой десульфурующей способности магния в смеси реагентов. Согласно данной зависимости для получения степени десульфурации чугуна, равной 80 %, достаточно иметь отношение между массой флюидизированной извести и массой магния около 4,3.

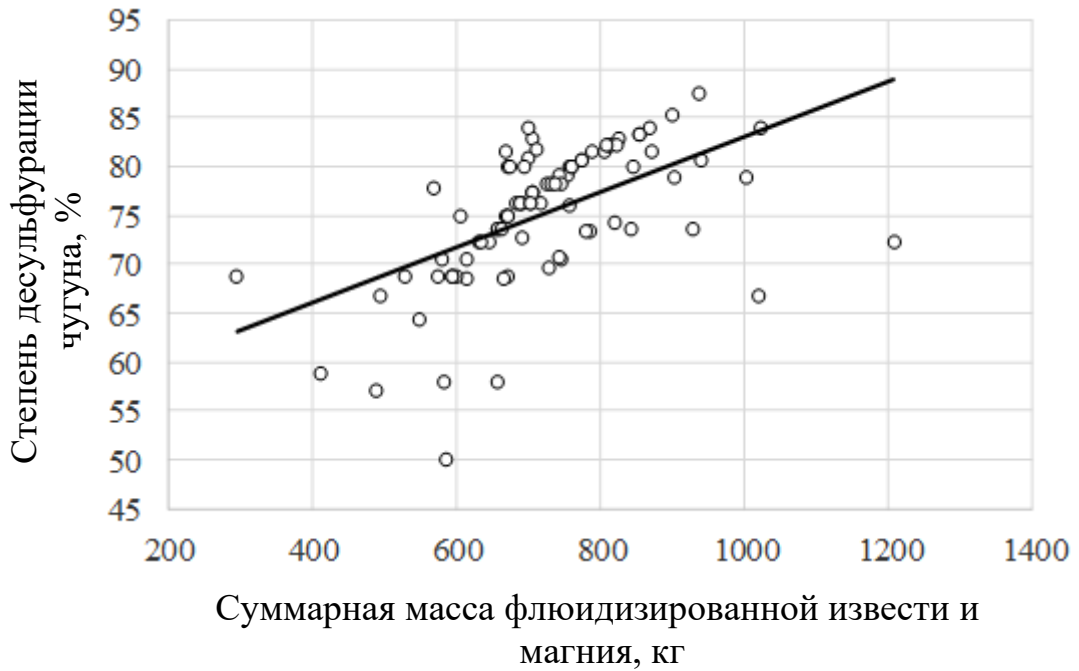


Рисунок 4.2 – Зависимость степени десульфурации чугуна ($\eta_{ч}$) от суммарной массы вдуваемых флюидизированной извести и магнезия ($R_{сум}$):

$$\eta_{ч} = 0,0282 \cdot R_{сум} + 54,82, \quad r = 0,552, \quad r_{0,001} = 0,343 \quad (4.2)$$

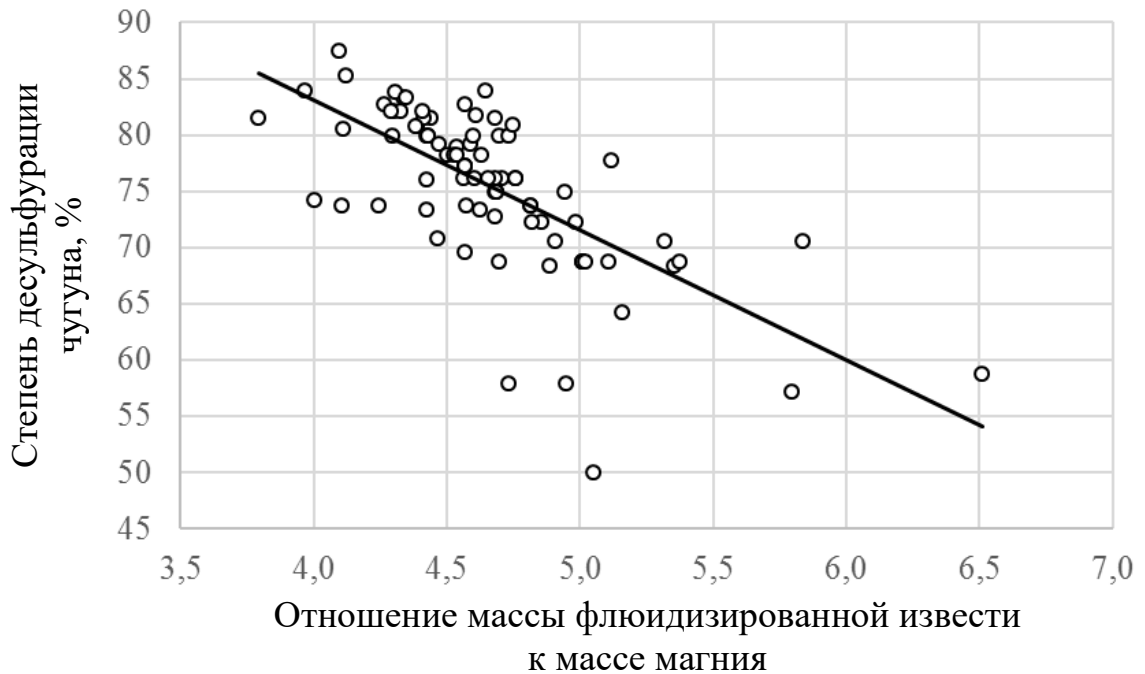


Рисунок 4.3 – Зависимость степени десульфурации чугуна ($\eta_{ч}$) от отношения массы флюидизированной извести к массе магнезия ($O_{расх}$):

$$\eta_{ч} = 129,34 - 11,56 \cdot O_{расх}, \quad r = -0,689, \quad r_{0,001} = 0,343 \quad (4.3)$$

Исходное содержание серы составляло от 0,014 до 0,036 % (среднее – 0,022 %). Конечное содержание серы в чугуна изменялось в интервале от 0,003 до 0,008 % и в среднем равнялось 0,005 %.

Таким образом, при опробовании на УДЧ технологии ковшевой десульфурации чугуна с удельным расходом флюидизированной извести и магния 1,9 и 0,4 кг/т соответственно при продувке длительностью до 15 мин достигнута средняя степень десульфурации 77,3 %.

Этот показатель оказался еще выше при широком опробовании технологии. Результаты ковшевой обработки чугуна за 15 месяцев приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты обработки чугуна на УДЧ при производстве стали марки SAWL 485 FD

Параметр	Значение
Количество ковшей чугуна, шт.	539
Продолжительность, мин: продувки обработки	11,1 31,8
Средний расход, кг/т: флюидизированная известь магний	1,76 0,40
Снижение температуры чугуна, °С	6
Среднее содержание серы, %: до обработки после обработки	0,020 0,003
Средняя степень десульфурации чугуна, %	85

Из представленных данных видно, что после освоения технологии ковшевой десульфурации чугуна при отношении массы флюидизированной

известии к массе магнезии 4,4 удалось получить конечное содержание серы на уровне 0,003 % и степень десульфурации металла – 85 %.

Достигнутые на УДЧ показатели ковшевой десульфурации чугуна находятся на уровне передовых металлургических предприятий.

Таким образом, на первой стадии десульфурации технологии производства стали марки SAWL 485 FD – при ковшевой обработке чугуна на УДЧ возможно достижение содержания серы в чугуне на уровне 0,003–0,005 %.

4.2 Выплавка полупродукта для получения ультранизкосернистой стали

Особенности выплавки металла в кислородном конвертере для получения ультранизкосернистой трубной стали следующие.

Доля металлического лома из собственной обрезки прокатных цехов не должна превышать 23 % от массы металлической шихты конвертерной плавки.

Применяется жидкий чугун в количестве не менее 77 % от массы металлической шихты с содержанием кремния не более 0,80 %, фосфора – не более 0,055 %, серы – не более 0,005 % после ковшевой обработки на УДЧ. При заливке чугуна обеспечивается попадание минимального количества шлака из заливочного ковша в конвертер. Величина «свободного борта» сталеразливочного ковша – не менее 400 мм.

Ожелезненный доломит в количестве 8 т вводится в завалку, не более 4 т до промежуточного скачивания шлака, которое является обязательным. Расход охладителей составляет не более 4 т в завалку и 2 т в продувку. Продувка начинается после введения части известии. Возможно использование алюмофлюса в количестве не более 400 кг на плавку.

Окисленность металла в конвертере перед выпуском должна быть не более 1200 ppm.

Додувка металла в конвертере не проводится.

Выпуск металла из конвертера продолжительностью не менее 6 мин производится только после получения результатов экспресс-анализа проб металла, отобранных на повалке. Содержание фосфора в металле должно быть не более 0,008 %, серы – не более 0,015 %, азота – не более 0,005 %.

Новый сталеразливочный ковш или после горячего ремонта не используется. Сталеразливочный ковш должен иметь две исправные пористые пробки для осуществления продувки металла аргоном.

Температура металла на выпуске для предотвращения восстановления фосфора из шлака должна быть равна 1660...1680 °С.

Отсечка первичного шлака производится конусом, вторичного – специальным дротиком или подрывом струи на металле.

Для раскисления-легирования металла используются предварительно прокаленные ферросплавы с содержанием фосфора не более 0,05 %. Ферросплавы, отдаваемые с площадки, прогреваются в контейнерах газовыми горелками. Материалы вводятся в ковш в следующей последовательности:

- ферромolibден, медь, никель (на дно пустого ковша);
- твердая шлакообразующая смесь (3,0–3,5 т извести и 0,7–0,8 т плавикового шпата) после наполнения $\frac{1}{4}$ ковша;
- силикомарганец;
- металлический марганец;
- алюминий чушковый в количестве 0,8–0,9 т;
- закончить введение материалов до заполнения ковша на $\frac{2}{3}$.

Толщина слоя шлака в сталеразливочном ковше не должна превышать 150 мм.

На практике используемые приемы отсечки шлака при выпуске металла из конвертера не обеспечивают отсутствие высокоокисленного шлака в ковше, что значительно осложняет проведение эффективной десульфурации металла ТШС. Степень десульфурации металла на данной стадии обработки очень нестабильна и не превышает 20–25 %.

4.3 Обработка металла на агрегате «ковш-печь»

На участке ковшевой обработки сталь марки DNV SAWL 485 FD поступает на агрегат «ковш-печь» (АКП) №2 [127–134]. Обработка стали на АКП является неотъемлемой частью технологии производства высококачественного металла в любом сталеплавильном цехе, обеспечивая увеличение производительности сталеплавильных агрегатов, экономию энергетических и материальных затрат, повышение степени рафинирования стали от вредных примесей, гомогенизацию и стабилизацию металла по температуре и химическому составу, способствует расширению сортамента стали. АКП облегчает согласование работы всех агрегатов, являясь буферным узлом между сталеплавильными агрегатами и МНЛЗ, что особенно важно при разливке стали сериями плавов, способствующей повышению выхода годного металла.

В начале ковшевой обработки стали на АКП №2 производится усреднительная продувка металла аргоном через верхнюю фурму, опущенную в крайнее нижнее положение. Продолжительность продувки должна быть не менее 8 мин. После ее окончания отбираются пробы металла и шлака.

После получения результатов анализа корректируется химический состав металла. Суммарная масса кусковых ферросплавов при корректировке должна составлять не более 1000 кг (без учета шлакообразующих материалов, кусковых углеродсодержащих материалов и алюминия). При коррекции химического состава металла вводом порошковой проволоки с различными наполнителями (феррониобием, ферротитаном и силикокальцием) масса порошковой проволоки (наполнитель и оболочка) не учитывается.

Корректировка химического состава кусковыми материалами должна производиться до вакуумирования металла.

При использовании порошковой проволоки с силикокальцием учитывается прирост содержания кремния в металле при его вводе.

После получения содержания серы в металле 0,003–0,005 % присадкой твердой шлакообразующей смеси из извести и плавикового шпата на шлак рекомендуется производить глубокую десульфурацию металла вдуванием флюидизированной извести в потоке аргона.

После получения требуемого содержания серы в металле продувка металла аргоном производится только через пористые пробки, установленные в днище сталеразливочного ковша.

Легирование металла титаном и ниобием рекомендуется производить вводом порошковой проволоки с соответствующим наполнителем. Ввод порошковой проволоки осуществляется в соответствии с действующей технологической инструкцией.

Перед окончанием обработки на АКП №2 металл должен иметь запас по температуре для последующей обработки на установке циркуляционного вакуумирования. Непосредственно перед передачей ковша на вакуумную установку производится продувка металла аргоном через верхнюю фурму продолжительностью не менее 5 мин, включая продувку с максимальным заглублением фурмы не менее 3 мин.

В работе исследован массив производственных данных из 29 плавов с предварительной десульфурацией чугуна, содержащего в среднем 0,005 % серы после ковшевой обработки.

Информация о среднем содержании серы в стали на разных этапах производства представлена на рисунке 4.4.

Сначала десульфурация металла производилась твердой шлакообразующей смесью (ТШС) в ковше во время выпуска металла из конвертера, состоящей из извести со средним расходом 8,7 кг/т и плавикового шпата (2,0 кг/т). Для раскисления шлака применялся гранулированный алюминий с расходом около 2,35 кг/т. Содержание серы в стали уменьшилось (см. рисунок 4.4) в среднем с 0,0095 % до 0,0075 %.

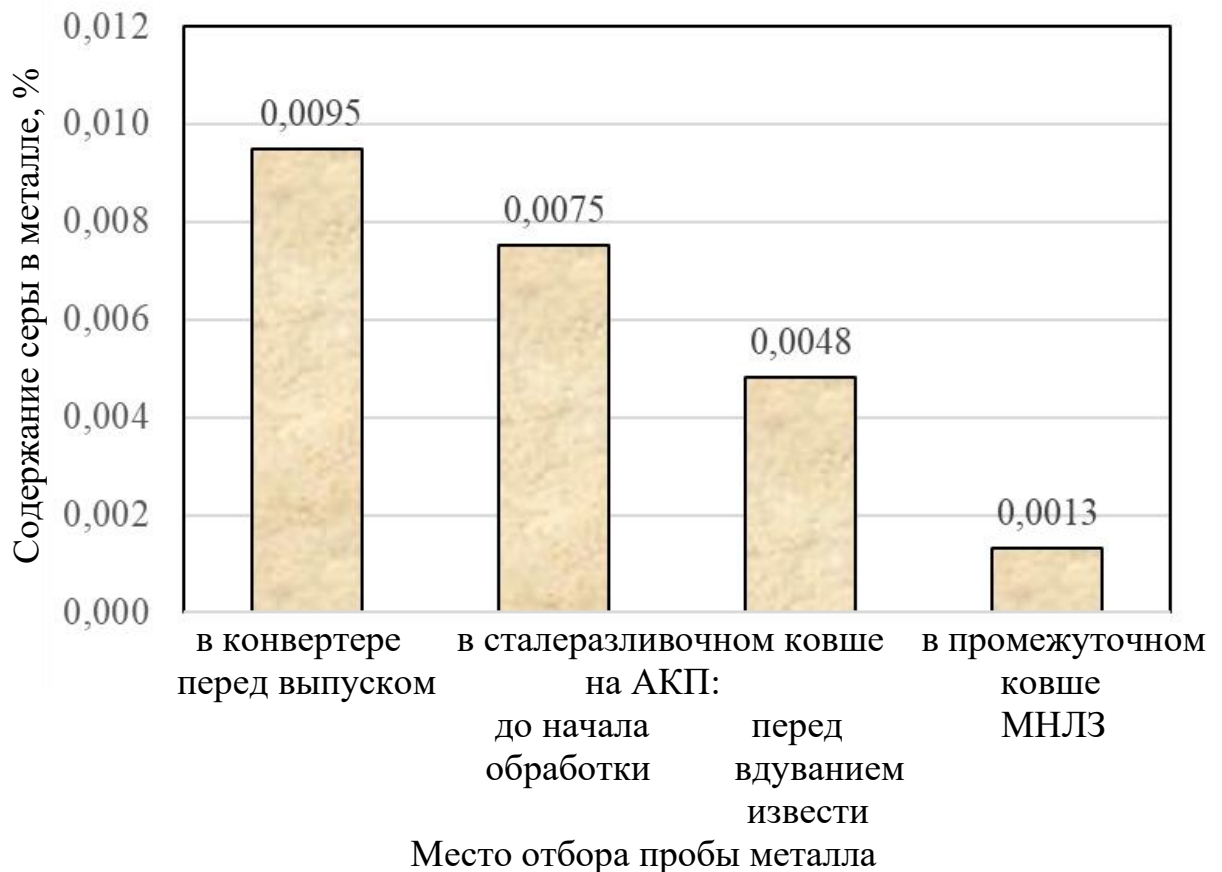


Рисунок 4.4 – Усредненные данные о содержании серы в металле на разных этапах производства стали марки DNV SAWL 485 FD

Дальнейшая десульфурация металла осуществляется на агрегате «ковш-печь» (АКП).

Для наведения «белого» шлака с суммарным содержанием оксидов железа и марганца не более 1 % в ковш вводились следующие материалы:

кусовая известь – 3,2 кг/т;

плавиковый шпат – 1,7 кг/т;

алюминий гранулированный – 0,26 кг/т.

Обработка производилась с обязательной продувкой металла аргоном через донные пробки ковша. Среднее содержание серы в металле снизилось (см. рисунок 4.4) с 0,0075 до 0,0048 %.

Для проведения глубокой десульфурации металла производилось вдувание в него флюидизированной извести производства ПАО «ММК» в потоке аргона через фурму.

Режим вдувания извести на АКП характеризовался параметрами, имеющими следующие средние значения:

расход флюидизированной извести – 2,63 кг/т;

продолжительность вдувания – 19 мин;

расход аргона – 3,8 м³.

Вдувание флюидизированной извести позволило уменьшить содержание серы (см. рисунок 4.4) в среднем с 0,0048 % до 0,0013 %.

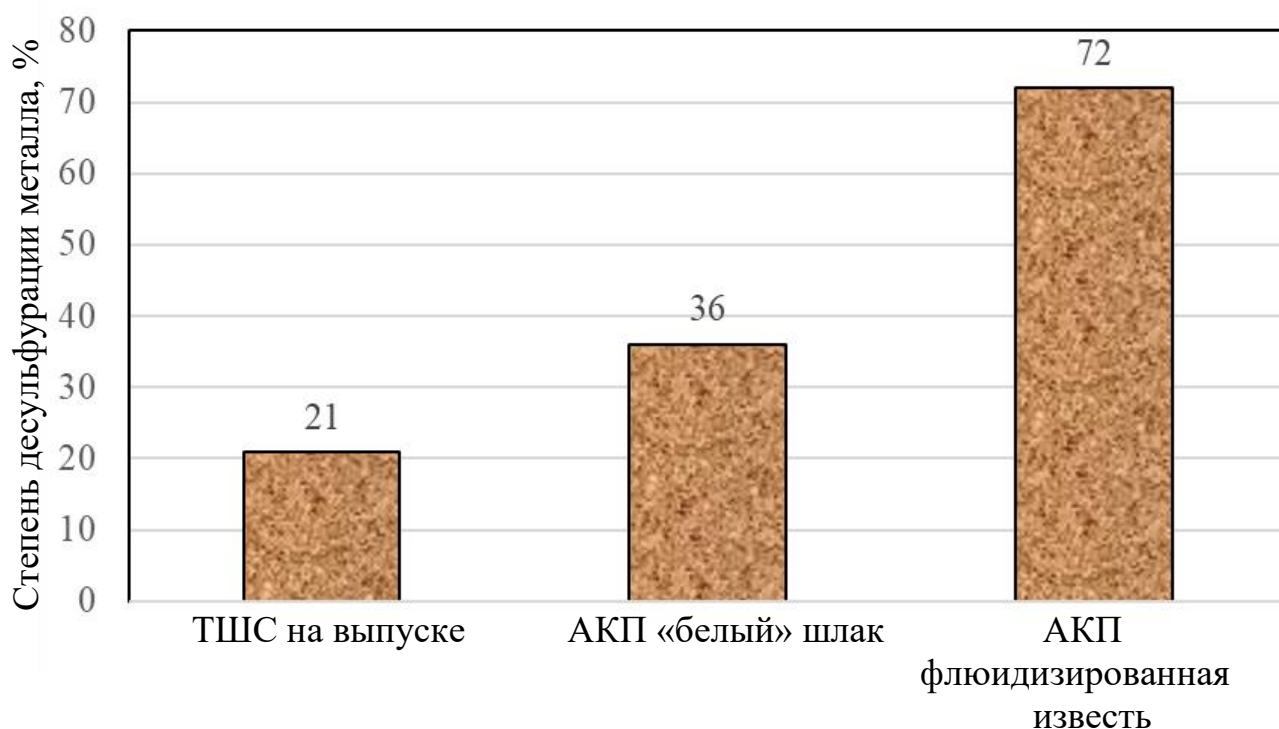
Информация об относительном количестве удаленной серы на разных стадиях ковшевой десульфурации стали представлена на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – Информация об относительном количестве серы, удаленной на разных стадиях ковшевой десульфурации стали марки DNV SAWL 485 FD

При обработке металла ТШС удаляется менее четвертой части (24 %) всей удаленной серы, а остальная – бóльшая (76 %) часть – на агрегате «ковш-печь».

Данные о средней степени десульфурации металла на разных стадиях ковшевой обработки приведены на рисунке 4.6.



Стадии ковшевой десульфурации металла

Рисунок 4.6 – Данные о средней степени десульфурации металла на разных стадиях ковшевой обработки

Наибольшая степень десульфурации металла достигается при вдувании флюидизированной извести (72 %), что в 3,4 и 2 раза превышает данный показатель при обработке ТШС на выпуске из конвертера и при обработке на АКП под «белым» шлаком.

При корреляционно-регрессионном анализе производственных данных десульфурации металла вводом ТШС на выпуске из конвертера не удалось выявить влияния параметров технологии на степень удаления серы, изме-

нявшейся в широком интервале значений от 13 до 36 %. Это объясняется попаданием в ковш при выпуске металла различного количества конвертерного шлака из-за отсутствия надежной его отсечки.

При десульфурации металла на АКП под «белым» шлаком выявлена зависимость между степенью десульфурации металла и отношением массы кусковой извести к массе плавикового шпата (рисунок 4.7).

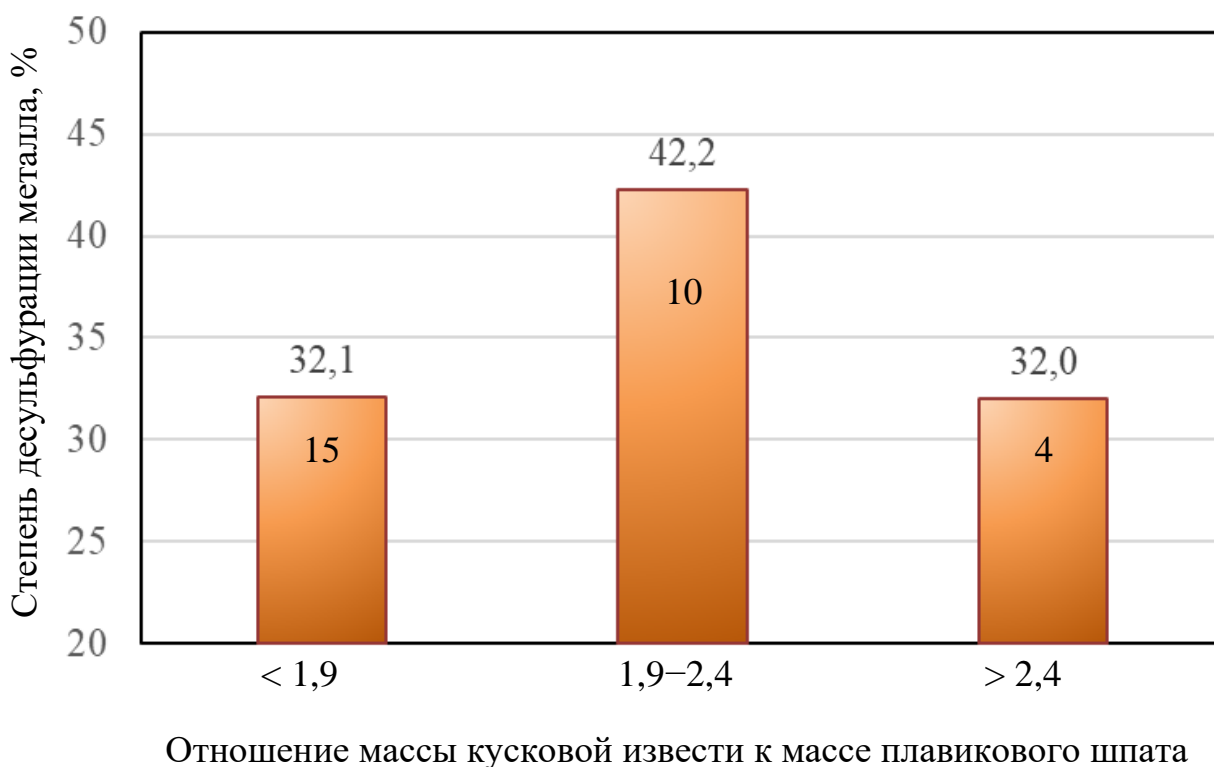


Рисунок 4.7 – Зависимость степени десульфурации металла на АКП под «белым шлаком» от отношения массы кусковой извести к массе плавикового шпата: цифры внутри столбиков – количество исследованных плавок

Из рисунка видно, что при отношении массы кусковой извести к массе плавикового шпата, равном 1,9–2,4, достигается наиболее эффективное удаление серы на данной стадии обработки.

Для десульфурации металла на АКП при вдувании флюидизированной извести определена линейная возрастающая зависимость степени десульфурации металла (η_m , %) от удельного расхода флюидизированной извести ($g_{\text{фи}}$, кг/т), приведенная на рисунке 4.8.

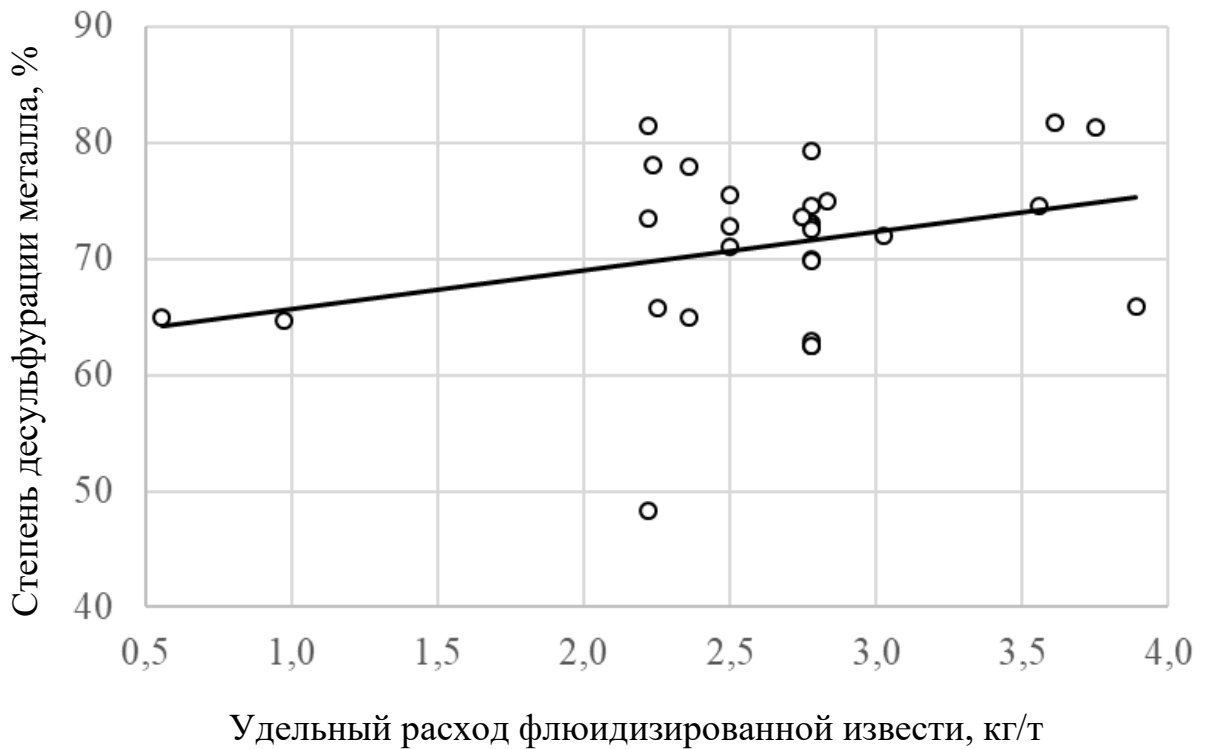


Рисунок 4.8 – Зависимость степени десульфурации металла от удельного расхода флюидизированной извести

Уравнение полученной зависимости имеет вид

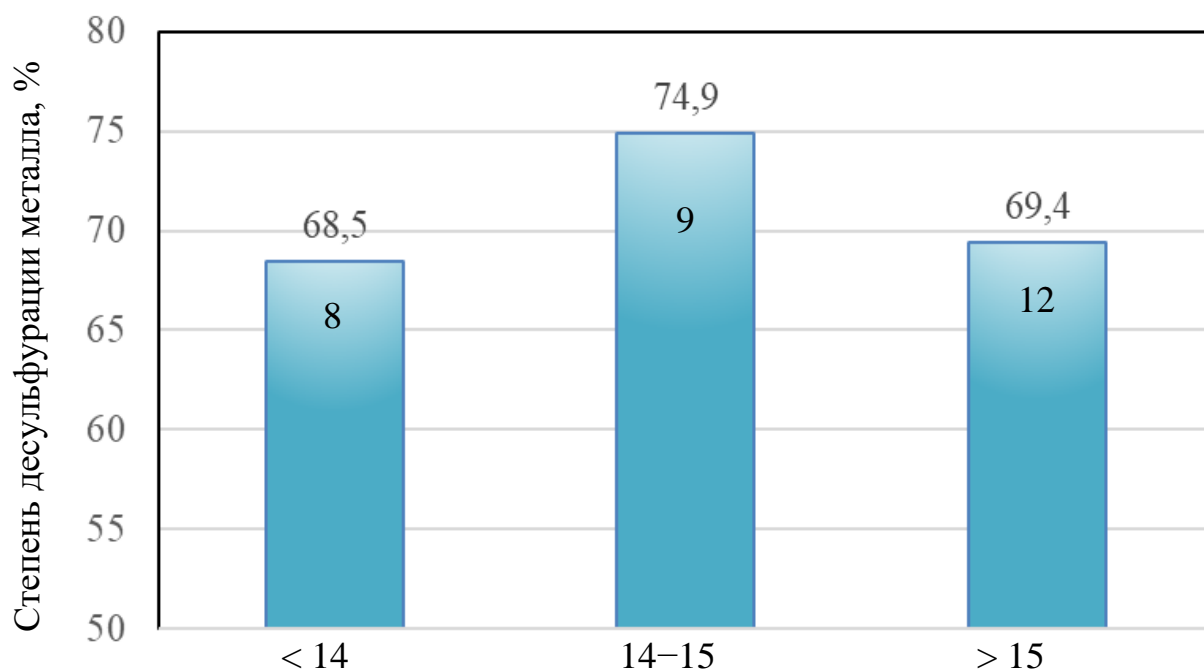
$$\eta_m = 3,34 g_{\text{фи}} + 62,37, \quad r = 0,315. \quad (4.4)$$

Данная зависимость статистически значима с вероятностью 90 %. Определенный интерес представляет зависимость, характеризующая влияние интенсивности вдувания флюидизированной извести на степень десульфурации металла (рисунок 4.9).

Из приведенных данных следует, что для улучшения удаления серы рекомендуется вдувать флюидизированную известь с интенсивностью 14–15 кг/(м³·мин).

Общая степень ковшевой десульфурации металла при получении стали марки DNV SAWL 485 FD составила 86 %.

Высокий уровень степени десульфурации стали этой марки подтверждается результатами анализа большого массива из 539 плавков, выплавлен-



Интенсивность вдувания флюидизированной извести, кг/(м³ · мин)

Рисунок 4.9 – Зависимость степени десульфурации металла на АКП от интенсивности вдувания флюидизированной извести в потоке аргона: цифры внутри столбиков – количество исследованных плавок

ных в течение 15 месяцев. Средние значения содержания серы в пробах металла, отобранных на повалке конвертера и из промежуточного ковша МНЛЗ, равнялись 0,007 и 0,0012 % соответственно. Значит средняя величина степени десульфурации составила 83 %.

При проведении исследования 29 плавок (см. рисунок 4.8) удельный расход флюидизированной извести изменялся в очень широких пределах от 0,6 до 3,9 кг/т – в 6,5 раз. Для уточнения необходимого расхода материала были дополнительно проведены 27 плавок стали класса прочности К60 и марки DNV SAWL 485 FD.

На рисунке 4.10 показана зависимость содержания серы в маркировочной пробе металла ($[S]$, %) от удельного расхода флюидизированной извести ($g_{фи}$, кг/т) на АКП.

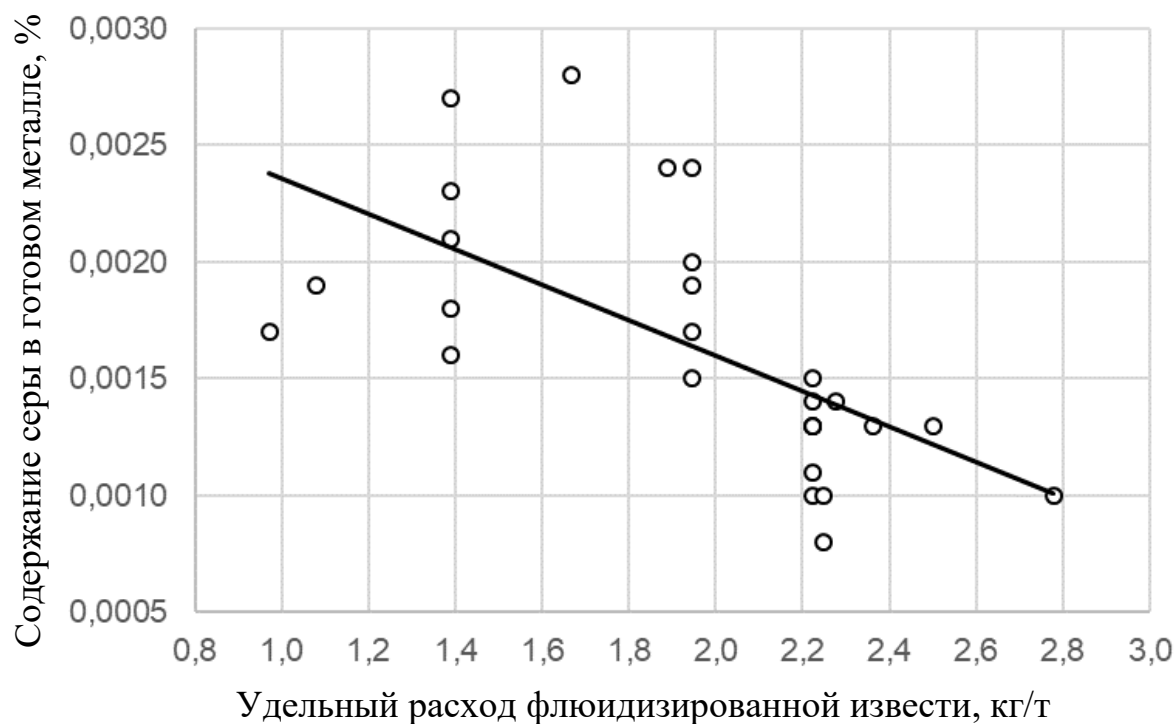


Рисунок 4.10 – Зависимость содержания серы в маркировочной пробе металла от удельного расхода флюидизированной извести на АКП

Данная зависимость описывается уравнением

$$[S] = 0,0031 - 0,0008 \cdot g_{fi}, \quad r = 0,637, \quad r_{0,001} = 0,597. \quad (4.5)$$

Зависимость (4.5) является статистически значимой с вероятностью 99,9 %.

Из рисунка 4.10 видно, что для получения содержания серы в стали марки DNV SAWL 485 FD не более 0,0015 % удельный расход флюидизированной извести должен быть в интервале 2,2–2,8 кг/т.

В работе также были рассчитаны значения итогового коэффициента распределения серы как отношение содержания серы в шлаке перед окончанием обработки на АКП к содержанию серы в маркировочной пробе металла. Коэффициент распределения серы между шлаком и металлом изменялся в очень широком интервале: от 100 до 400. На рисунке 4.11 приведена зависимость коэффициента распределения серы (L_s) от удельного расхода флюидизированной извести (g_{fi} , кг/т), имеющая вид

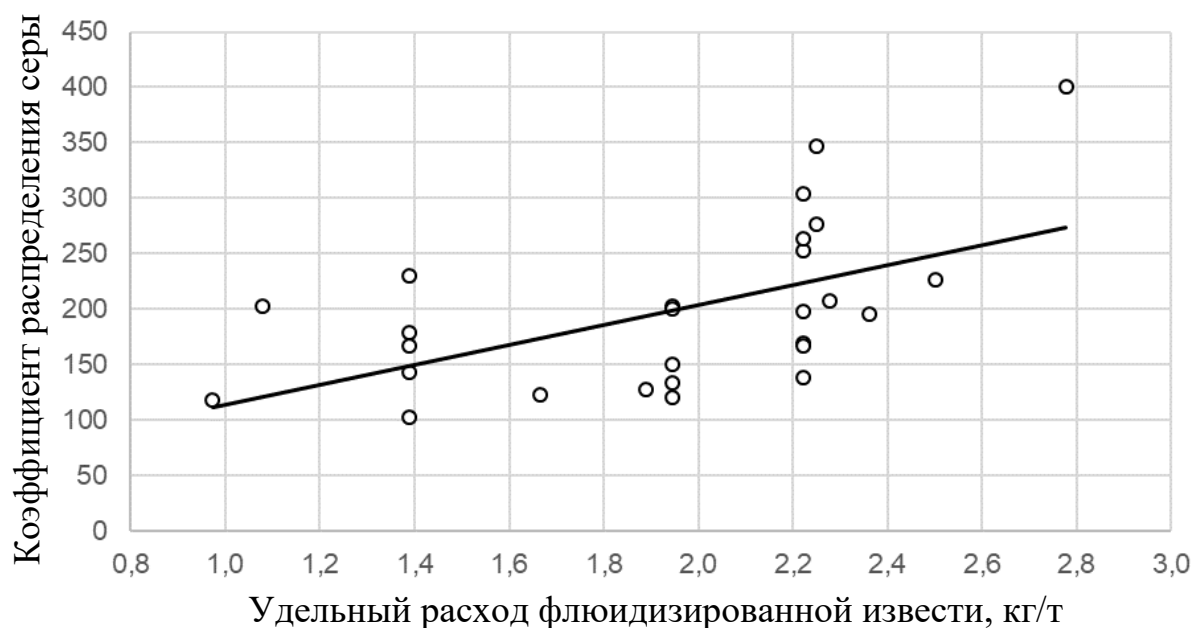


Рисунок 4.11 – Зависимость итогового коэффициента распределения серы от удельного расхода флюидизированной извести

$$L_s = 89,72 \cdot g_{\phi u} + 24,51, \quad r = 0,556; \quad r_{0,01} = 0,487. \quad (4.6)$$

Данная линейная зависимость существуют с вероятностью 99,0 %.

Согласно уравнению (4.6) при расходе флюидизированной извести на АКП от 2,2 до 2,8 кг/т итоговый коэффициент распределения серы изменяется в интервале от 220 до 275.

В конце ковшевой обработки на АКП шлак имеет следующий химический состав (% по массе, средние значения):

<i>CaO</i>	<i>SiO₂</i>	<i>MgO</i>	<i>MnO</i>	<i>FeO</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>S</i>
56,0	10,0	7,0	0,5	0,8	23,0	0,30.

Основность шлака равна в среднем 5,6 при температуре около 1580–1600 °С.

Таким образом, разработанная технология десульфурации металла позволяет получать ультранизкосернистую трубную сталь с содержанием серы менее 0,0015 % для производства электросварных прямошовных труб большого диаметра.

4.4 Вакуумная обработка металла

Перед началом вакуумной дегазации выполняется измерение содержания водорода в металле с помощью системы «Hydris».

Вакуумная дегазация металла осуществляется при остаточном давлении в вакуумной камере не более 10 мм рт. ст. (13,3 мбар).

Расход аргона в патрубок вакуумной камеры должен составлять не менее 500 л/мин.

Подача кислорода в вакуумную камеру в процессе обработки не производится.

Продолжительность вакуумной дегазации металла должна быть не менее 30 мин.

Конечное содержание водорода в металле не должно превышать 2,0 ppm.

При недостаточной температуре металла после окончания вакуумной обработки разрешается производить электродуговой нагрев металла на АКП №2.

При этом корректировка химического состава металла присадкой порошковой проволоки, алюминиевой катанки, кусковыми раскислителями, а также присадка шлакообразующих материалов не производится.

В случае необходимости введения кальция перед вводом производится продувка аргоном через верхнюю фурму с максимальным заглублением продолжительностью не менее 2,0 мин. Ввод порошковой проволоки с силико-кальцием осуществляется с расходом по наполнителю 0,5–0,6 кг/т. После этого металл не менее 10 мин продувается аргоном с расходом не ниже 10 м³/ч.

Рекомендуемое содержание алюминия перед передачей плавки на МНЛЗ равняется 0,030–0,035 %, а кислорода – не более 5 ppm.

Продолжительность нахождения металла в сталеразливочном ковше должна составлять не более 3 ч 15 мин.

4.5 Разливка стали на МНЛЗ

Из стали марки DNV SAWL 485 FD отливаются слябовые непрерывнолитые заготовки с размерами поперечного сечения 300×2600 мм следующей мерной длины:

2310 мм – для получения из одного сляба одного годного горячекатаного листа толщиной 30,9 мм;

4210 мм – для получения из одного сляба двух годных горячекатаных листов толщиной 30,9 мм;

2590 мм – для получения из одного сляба одного годного листа толщиной 34,6 мм.

Температура ликвидус стали изменяется в интервале 1517–1521 °С и в среднем равна 1519 °С.

Перегрев металла в сталеразливочном ковше над температурой ликвидус составляет 50–70 °С, а в промежуточном ковше МНЛЗ – 15–35 °С.

Скорость вытягивания сляба из кристаллизатора изменяется в диапазоне 0,7–0,85 м/мин в зависимости от температуры разливаемого металла.

Мягкое обжатие слябов в процессе разливки производится на величину 4,0–6,0 мм.

Вторичное охлаждения слябов проводится согласно режиму, применяемому для группы низкоуглеродистой стали с легирующими элементами.

В процессе разливки металла одной плавки отбираются четыре пробы металла из промежуточного ковша: первая – через 5–10 минут от начала разливки, вторая (маркировочная) и третья (резервная) – в середине разливки, четвертая – при остатке металла в сталеразливочном ковше 30–50 т.

Продолжительность серии из стали марки DNV SAWL 485 FD должна быть не более 14 плавов.

Начинать и заканчивать серию рекомендуется сталью другой марки.

После отливки слябы подвергаются замедленному охлаждению в течение 48 ч.

Производится контроль качества макроструктуры слябов перед началом прокатки.

На стане «5000» из непрерывнолитых слябов изготовлен толстый горячекатаный лист толщиной 30,9 и 34,6 мм, поставленный в ПАО «ЧТПЗ» в количестве 451673 т (приложение А). Данные о себестоимости непрерывнолитых слябов из ультранизкосернистой стали представлены в приложении В.

Выводы по четвертой главе

1 При производстве ультранизкосернистой трубной стали чугуна перед заливкой в конвертер обрабатывается на установке десульфурации чугуна с вдуванием в потоке азота флюидизированной извести и магнезия. В работе установлены статистически значимые зависимости степени десульфурации чугуна от продолжительности продувки азотом, суммарного расхода флюидизированной извести и магнезия, а также от отношения их расходов. С уменьшением этого отношения от 6,5 до 3,8 эффективность обработки растет, что свидетельствует о более высокой десульфурующей способности магнезия в смеси реагентов. После освоения технологии ковшевой десульфурации чугуна при среднем отношении массы флюидизированной извести к массе магнезия 4,4 удалось получать конечное содержание серы на уровне 0,003 % и степень десульфурации чугуна – 85 %.

2 Особенности выплавки полупродукта в 370-т конвертере с верхней продувкой кислородом заключаются в определенном соотношении расходов жидкого чугуна и лома, их составе, в чугуне содержание серы не должно превы-

шать 0,005 %, обязательном проведении промежуточного скачивания шлака и наведения нового, отсутствии додувки металла, содержании серы в металле перед выпуском из конвертера не более 0,015 %, количестве вводимой в ковш твердой шлакообразующей смеси из кусковой извести и плавленого шпата и других параметрах. Степень десульфурации металла на данной стадии обработки очень нестабильна из-за недостаточно надежной отсечки конвертерного шлака и составляет в среднем 24 %.

3 Основной вклад в десульфурацию металла вносит обработка стали на агрегате «ковш-печь» – удаляется около 76 % от общего количества серы. Она состоит из двух стадий: первой – обработки металла под «белым» шлаком для снижения содержания серы в стали до 0,003–0,005 % и второй – глубокой десульфурации путем вдувания в потоке аргона флюидизированной извести. На первой стадии обработки выявлена зависимость между степенью десульфурации металла и отношением массы кусковой извести к массе плавленого шпата. При отношении, равном 1,9–2,4, достигается наиболее эффективное удаление серы на данной стадии обработки. Для второй стадии обработки в работе определена линейная возрастающая зависимость степени десульфурации металла от удельного расхода флюидизированной извести и зависимость от интенсивности вдувания флюидизированной извести. Для улучшения удаления серы рекомендуется вдувать флюидизированную известь с интенсивностью 14–15 кг/(м³·мин). Установлена линейная зависимость коэффициента распределения серы от удельного расхода флюидизированной извести на АКП. Согласно данной зависимости при рекомендованном расходе флюидизированной извести от 2,2 до 2,8 кг/т итоговый коэффициент распределения серы изменяется в интервале от 220 до 275. Общая степень ковшевой десульфурации металла 539 плавов при получении стали марки DNV SAWL 485 FD составила 83 %.

4 Разработанная технология десульфурации металла позволяет получать ультранизкосернистую трубную сталь с содержанием серы менее 0,0015 % для производства электросварных прямошовных труб большого диаметра.

5 В работе рассмотрены особенности вакуумной обработки стали марки DNV SAWL 485 FD на установке вакуумирования стали циркуляционного типа и разливки на одноручьевой МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком на слябы сечением 300×2600 мм.

6 На стане «5000» произведен горячекатаный лист толщиной 30,9 и 34,6 мм для производства электросварных прямошовных труб по проекту «Северный поток-2». В ПАО «Челябинский трубопрокатный завод» отгружено 451673 т листа. Себестоимость непрерывнолитого сляба из стали марки DNV SAWL 485 FD равняется в среднем около 29 тыс. руб., что составляет примерно 72 % от стоимости горячекатаного листа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Для получения ультранизкосернистой стали марки DNV SAWL 485 FD в ККЦ ПАО «ММК» десульфурация металла проводится в несколько этапов:

первый – ковшевая обработка чугуна на УДЧ вдуванием смеси из флюидизированной извести и магнезия в потоке азота;

второй – ковшевая обработка полупродукта в процессе его выпуска из конвертера твердой шлакообразующей смесью;

третий – ковшевая обработка стали на агрегате «ковш-печь» в две стадии:

- обработка под «белым» шлаком;
- вдувание флюидизированной извести в потоке аргона.

2 На первом этапе десульфурации металла установлены статистически значимые зависимости степени десульфурации чугуна от продолжительности продувки азотом, суммарного расхода флюидизированной извести и магнезия, а также от отношения их массы. Выявлена более высокая десульфурующая способность магнезия в смеси реагентов. После освоения технологии ковшевой десульфурации чугуна при среднем отношении массы флюидизированной извести к массе магнезия 4,4 удалось получать конечное содержание серы на уровне 0,003 % и степень десульфурации чугуна – 85 %.

3 Особенности выплавки полупродукта в 370-т конвертере с верхней продувкой кислородом заключаются в определенном соотношении расходов жидкого чугуна и лома, их составе, в чугуне содержание серы не должно превышать 0,005 %, обязательном проведении промежуточного скачивания шлака и наведения нового, отсутствии додувки металла, содержании серы в металле перед выпуском из конвертера не более 0,015 %, количестве вводимой в ковш твердой шлакообразующей смеси из кусковой извести и плавикового шпата и других параметрах. Степень десульфурации металла на втором этапе

десульфурации металла очень нестабильна из-за недостаточно надежной отсечки конвертерного шлака и в среднем составляет 24 %.

4 Основной вклад в десульфурацию металла вносит третий этап – обработка стали на агрегате «ковш-печь», когда удаляется около 76 % от общего количества серы. На первой стадии обработки стали под «белым» шлаком для снижения содержания серы в стали до 0,003–0,005 % выявлена зависимость между степенью десульфурации металла и отношением массы кусковой извести к массе плавикового шпата. При отношении, равном 1,9–2,4, достигается наиболее эффективное удаление серы. Для второй стадии обработки – глубокой десульфурации стали путем вдувания в потоке аргона флюидизированной извести определена линейная возрастающая зависимость степени десульфурации металла от удельного расхода флюидизированной извести и зависимость от интенсивности вдувания флюидизированной извести. Для улучшения удаления серы рекомендуется вдувать флюидизированную известь с интенсивностью 14–15 кг/(м³·мин). Установлена линейная зависимость коэффициента распределения серы от удельного расхода флюидизированной извести на АКП. Согласно данной зависимости при рекомендованном расходе флюидизированной извести от 2,2 до 2,8 кг/т итоговый коэффициент распределения серы изменяется в интервале от 220 до 275. Общая степень ковшевой десульфурации металла 539 плавок при получении стали марки DNV SAWL 485 FD составила 83 %.

5 Разработанная технология десульфурации металла позволяет получать ультранизкосернистую трубную сталь с содержанием серы менее 0,0015 % для производства электросварных прямошовных труб большого диаметра.

6 В работе также рассмотрены особенности вакуумной обработки стали марки DNV SAWL 485 FD на установке вакуумирования стали циркуляционного типа и разливки на одноручьевой МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком на слябы сечением 300×2600 мм.

7 На стане «5000» произведен горячекатаный лист толщиной 30,9 и 34,6 мм для производства электросварных прямошовных труб по проекту «Северный поток-2». В ПАО «Челябинский трубопрокатный завод» отгружено 451673 т листа. Себестоимость непрерывнолитого сляба из стали марки DNV SAWL 485 FD равняется в среднем около 29 тыс. руб., что составляет примерно 72 % от стоимости горячекатаного листа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Выдрин, А.В. Развитие технологий производства сварных труб / А.В. Выдрин, А.О. Струин // Черные металлы. – 2015. – № 1 (997). – С. 29-33.
- 2 Выдрин, А.В. Инновационные технологии производства труб / А.В. Выдрин // Производство проката. – 2013. – № 4. – С. 8-17.
- 3 Герреро, Б.Л. Оценка перспектив транспортировки газа в Европу / Б.Л. Герреро // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. – 2018. – Т. 8. – № 2 (27). – С. 220-230.
- 4 Аксютин, О.Е. Повышение надежности функционирования газотранспортной системы ОАО «Газпром» / О.Е. Аксютин // Газовая промышленность. – 2010. – № 3 (643). – С. 22-25.
- 5 Алимов, С.В. О состоянии и перспективах развития магистрального транспорта газа / С.В. Алимов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2009. – № 4 (16). – С. 4-8.
- 6 Панаедова, Г.И. Энергетические риски и тенденции развития газовой отрасли в современных условиях / Г.И. Панаедова // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2015. – № 4 (49). – С. 86-93.
- 7 Коликов, А.П. Производство стальных труб для магистральных трубопроводов в России / А.П. Коликов // Черные металлы. – 2008. – № 11. – С. 8-10.
- 8 Юзов, О.В. Тенденции изменения показателей производства стальных труб на предприятиях России / О.В. Юзов, Т.М. Петракова // Сталь. – 2016. – № 9. – С. 71-77.
- 9 Марченко, В.Н. Современные тенденции разработки и производства сталей и труб для магистральных газо- и нефтепроводов / В.Н. Марченко, Б.Ф. Зинько // Металлург. – 2008. – № 3. – С. 49-55.

- 10 Крылов, П.В. Промежуточные итоги и перспективы реализации стратегии импортозамещения продукции и технологий на объектах ПАО «Газпром» / П.В. Крылов // Газовая промышленность. – 2017. – № 1 (747). – С. 86-93.
- 11 Келлер, М. Магистральные стальные трубы для транспортировки ископаемых энергоносителей / М. Келлер, Х. Хилленбранд, Г. Клостер и др. // Черные металлы. – 2002. – № 10. – С. 43-51.
- 12 Хайстеркамп, Ф. Высокотехнологичные трубы для надежной транспортировки газа / Ф. Хайстеркамп, А.С. Болотов, К. Хулка и др. // Газовая промышленность. – 1998. – № 5. – С. 24-25.
- 13 Горынин, И.В. Пат. 2426800 RU, МПК С21D 8/02, С22С 38/44, С22С 38/48, С21D 9/46. Способ производства штрипса для труб магистральных трубопроводов / И.В. Горынин, В.В. Рыбин, В.А. Малышевский и др. Заявл. 12.12.2008; опубл. 20.08.2011. – Бюл. № 23.
- 14 Коликов, А.П. Развитие производства стальных труб / А.П. Коликов, Л.А. Кондратов // Металлург. – 2008. – № 2. – С. 11-16.
- 15 Ушаков, А.С. О производстве стальных труб / А.С. Ушаков, Л.А. Кондратов // Сталь. – 2018. – № 7. – С. 33-43.
- 16 Люгай, Д.В. Развитие минерально-сырьевой базы газовой отрасли промышленности России и ПАО «Газпром»: итоги, проблемы, перспективы / Д.В. Люгай, В.В. Рыбальченко, А.Е. Рыжов и др. // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». – 2018. – № 3 (35). – С. 33-45.
- 17 Шабалов, И.П. Тенденции развития конструкционных материалов для труб и сварных конструкций / И.П. Шабалов, В.Г. Филиппов, О.Н. Чевская // Перспективные материалы и технологии: монография. В 2-х томах. Под редакцией В.В. Клубовича. – Витебск, 2017. – С. 217-236.
- 18 Направления совершенствования конструкционных материалов для газо- и нефтепроводов / И.П. Шабалов, В.Г. Филиппов, О.Н. Чевская и др. // Металлург. – 2017. – № 6. – С. 48-55.

- 19 Рыбин, В.В. Технологии создания конструкционных наноструктурированных сталей / В.В. Рыбин, В.А. Малышевский, Е.И. Хлусова // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2009. – № 6 (648). – С. 3-7.
- 20 Высокопрочные стали для магистральных трубопроводов / В.В. Рыбин, В.А. Малышевский, Е.И. Хлусова и др. // *Вопросы материаловедения.* – 2009. – № 3 (59). – С. 127-137.
- 21 Рыбин, В.В. Технологии создания конструкционных наноструктурированных сталей для труб большого диаметра / В.В. Рыбин, В.А. Малышевский, Е.И. Хлусова // *Проблемы черной металлургии и материаловедения.* – 2009. – № 2. – С. 69-73.
- 22 Роль технологического и металлургического передела в процессе образования стресс-коррозионных повреждений в трубах из сталей классов прочности X70-X80 / И.Г. Родионова, А.И. Зайцев, К.А. Удод и др. // *Научно-технический сборник «Вести газовой науки».* – 2016. – № 3 (27). – С. 37-47.
- 23 Захаров, Е.В. Состояние и перспективы освоения газового потенциала недр шельфа российских морских акваторий / Е.В. Захаров, В.В. Рыбальченко // *Газовая промышленность.* – 2014. – № 4 (705). – С. 22-27.
- 24 Инновации в области морского строительства: от труб до трубопровода – проект «Турецкий поток» / Д. Чаудури, А.В. Никулин, Э. Юрдик и др. // *Газовая промышленность.* – 2019. – № 1 (779). – С. 18-21.
- 25 Шахпазов, Е.Х. Некоторые направления развития металлургической технологии для обеспечения растущих требований к уровню, стабильности свойств и эксплуатационной надежности массовых высококачественных сталей / Е.Х. Шахпазов, А.И. Зайцев, И.Г. Родионова // *Проблемы черной металлургии и материаловедения.* – 2010. – № 4. – С. 5-17.
- 26 Шахпазов, Е.Х. Современные проблемы металлургии и материаловедения стали / Е.Х. Шахпазов, А.И. Зайцев, И.Г. Родионова // *Металлург.* – 2009. – № 4. – С. 25-31.

- 27 Пышминцев, И.Ю. Проблемы и решения применения высокопрочных труб для магистральных газопроводов нового поколения / И.Ю. Пышминцев, В.Н. Лозовой, А.О. Струин // Наука и техника в газовой промышленности. – 2009. – № 1 (36). – С. 22-29.
- 28 Разработка технологий производства на стане 5000 проката для проектов трубопроводов с экстремальными параметрами / В.И. Ильинский, С.В. Головин, П.П. Степанов и др. // Metallurg. – 2017. – № 8. – С. 57-68.
- 29 Кислицын, Е.В. Факторы развития экспортной газотранспортной системы России / Е.В. Кислицын // Вестник Самарского государственного экономического университета. – 2016. – № 5 (139). – С. 42-49.
- 30 Лифанов, В.Я. Трубная промышленность сегодня и завтра / В.Я. Лифанов // Черная металлургия. – 2018. – № 11 (1427). – С. 5-13.
- 31 Булаев, С.А. Газопровод «Северный поток-2»: задачи, перспективы / С.А. Булаев // Управление устойчивым развитием. – 2016. – № 2 (03). – С. 27-34.
- 32 Баренцево-Карский регион – новый объект поисково-разведочных работ на нефть и газ в XXI веке / Э.М. Галимов, А.С. Немченко-Ровенская, В.С. Севастьянов и др. // Недропользование XXI век. – 2008. – № 6. – С. 43-53.
- 33 Никитин, Б.А. Перспективы освоения газовых ресурсов шельфа арктических морей России / Б.А. Никитин, А.Д. Дзюбло // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». – 2017. – № 4 (32). – С. 15-24.
- 34 Перспективы освоения залежей углеводородов на объектах деятельности ПАО «Газпром» в Карском море / С.Г. Крекнин, Р.Н. Окишев, А.Ф. Огнев и др. // Геология нефти и газа. – 2016. – № 2. – С. 25-32.
- 35 Матросов, Ю.И. Освоение в ОАО «Азовсталь» промышленного производства толстолистовой стали категории прочности Х65 для глубоководного газопровода / Ю.Н. Матросов, И.В. Ганошенко, О.А. Багмет // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2007. – № 1. – С. 24-31.

- 36 Салина, Т.К. Освоение северных территорий как фактор устойчивого развития ТЭК СЗФО / Т.К. Салина // Стратегия устойчивого развития регионов России. – 2011. – № 8. – С. 112-118.
- 37 Студеникина, Л.А. Геополитическая роль газопровода «Северный поток» в обеспечении энергобезопасности Европейского союза / Л.А. Студеникина, М.Ю. Халатина // Нефть, газ и бизнес. – 2012. – № 6. – С. 46-48.
- 38 Котомин, А.Б. Проблемы и перспективы развития газотранспортной системы Евро-арктической зоны России / А.Б. Котомин // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2014. – № 6 (43). – С. 7-11.
- 39 Мансуров, М.Н. О перспективах газонефтеносности на шельфе морей восточной Арктики / М.Н. Мансуров, Е.В. Захаров // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». – 2015. – № 2 (22). – С. 15-20.
- 40 Освоение производства труб большого диаметра с повышенной деформационной способностью / И.Ю. Пышминцев, А.О. Струин, А.М. Гервасьев и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2016. – Т. 16. – № 1. – С. 82-90.
- 41 Тимошилов, В.П. О некоторых итогах, проблемных вопросах и роли государства при реализации Восточной газовой программы / В.П. Тимошилов // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. – 2014. – № 9. – С. 4-11.
- 42 Коржубаев, А.Г. Перспективы развития нефтегазового комплекса Восточной Сибири и Дальнего востока / А.Г. Коржубаев // Регион: Экономика и Социология. – 2011. – № 2. – С. 193-210.
- 43 Эдер, Л.В. Нефтегазовый комплекс Восточной Сибири и Дальнего востока: тенденции, проблемы, современное состояние / Л.В. Эдер, И.В. Филимонова, С.А. Моисеев // Бурение и нефть. – 2015. – № 12. – С. 3-12.
- 44 Кин, А.А. Магистральный трубопровод «Сила Сибири»: основные положения крупномасштабного проекта / А.А. Кин // Регион: Экономика и Социология. – 2016. – № 2 (90). – С. 154-164.

- 45 Состояние и перспективы развития сталей для газопроводных труб большого диаметра / Ю.И. Матросов, Ю.Д. Морозов, Л.И. Эфрон и др. // Труды IV международной научно-технической конференции. – Ялта. – 2002. – С. 23-25.
- 46 Хулка, К. Тенденции разработки сталей для труб большого диаметра / К. Хулка // Сталь. – 1997. – № 10. – С. 62.
- 47 Эфрон, Л.И. Металловедение в большой металлургии. Трубные стали / Л.И. Эфрон. – М.: Металлургиздат, 2012. – 696 с.
- 48 Ефанов, В.И. Вопросы реконструкции российской газотранспортной системы / В.И. Ефанов // Наука и техника в газовой промышленности. – 2005. – № 2. – С. 10-14.
- 49 Будзуляк, Б.В. Основные направления повышения надёжности и безопасности газотранспортных систем ОАО «Газпром» / Б.В. Будзуляк // Газовая промышленность. – 2005. – № 8. – С. 12-14.
- 50 Steel – Meeting the Needs of an Evolving Linepipe Industry / D. Langley, C. Killmore, F. Barbaro, J. Williams. // Steel for Pipelines. – 2010. – 10 p.
- 51 Энергетическая стратегия России на период до 2030 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>.
- 52 Освоение производства штрипса К70 для труб большого диаметра на стане 5000 / А.А. Немтинов, А.М. Корчагин, А.Г. Попков А.Г. и др. // Металлург. – 2008. – № 11. – С. 51-54.
- 53 Шмаков, А.В. Технологические аспекты получения трубной заготовки категории прочности X100-X120 в условиях толстолиствого стана 5000 ОАО «ММК» / А.В. Шмаков // Фазовые и структурные превращения в сталях: сб. науч. тр. Вып. 6 / Под ред. В.Н. Урцева. – Магнитогорск, 2010. – С. 369-378.
- 54 Салганик, В.М. Моделирование процесса контролируемой прокатки трубной заготовки стана 5000 ОАО «ММК» / В.М. Салганик, А.В. Шмаков, Д.О. Пустовойтов // Труды восьмого конгресса прокатчиков. – Москва. – 2010. – Т. 1. – С.59-67.

55 Salganik, V. Plate rolling modeling at mill 5000 of OJSC «Magnitogorsk Iron and Steel» for analysis and optimization of temperature rates / V. Salganik, A. Shmakov, A. Pesin, D. Pustovoytov // Proceedings of the 10th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes «NUMIFORM 2010». Pohang, Republic of Korea. – 2010. – pp. 602-608.

56 Разработка эффективной технологии производства высокорентабельного инновационного проката на стане 5000 ОАО «ММК» / В.М. Салганик, С.В. Денисов, Д.Г. Набатчиков и др. // Сборник докладов 4-го междунаро- д. промышленного форума. – Челябинск, 2011. – С. 110-115.

52 Ввод в эксплуатацию толстолистового стана 5000 – новый этап развития технологии производства проката в ОАО «ММК» / Г.А. Куницын, С.В. Денисов, С.Н. Горшков и др. // Металлург. – 2009. – № 7. – С. 4-5.

57 Освоение на толстолистовом стане 5000 Выксунского металлургического завода производства высококачественного проката для труб большого диаметра / П.П. Степанов, И.В. Гоношенко, В.И. Ильинский и др. // Черная металлургия. – 2013. – № 4. – С. 57-65.

58 Мартынов, П.Г. Исследование трубных сталей категорий прочности X100-X120 для магистральных газопроводов / П.Г. Мартынов, И.А. Симбухов, Ю.Д. Морозов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2012. – № 3. – С. 66-71.

59 Влияние различных схем термомеханической контролируемой прокатки на структуру и свойства проката из трубных сталей класса прочности X80-X100 / Д.А. Рингинен, А.В. Частухин, Г.Е. Хадеев и др. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2017. – № 1. – С. 25-38.

60 Голованенко, С.А. Высокопрочные стали для магистральных газопроводных труб / С.А. Голованенко, Ю.И. Матросов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1977. – № 10. – С. 29-35.

61 Пател, Дж. Создание сталей для магистральных трубопроводов за последние десятилетия / Дж. Пател, К. Хулка // Прогрессивные листовые стали для

газопроводных труб большого диаметра и металлоконструкций особого назначения: сб. докладов. – М.: Metallurgizdat, 2004. – С. 34-42.

62 Schwinn, V. Production and progress work on plates for pipes with strength levels of X80 and above / V. Schwinn, P. Fluess, J. Bauer // Proceedings of the International Pipe Dreamer's Conference. Yokohama, Japan. – 2002. – pp. 339-353.

63 Толстолистовая сталь для газопроводных труб категории прочности X80 / А.П. Белый, Ю.И. Матросов, И.В. Гоношенко и др. // Сталь. – 2006. – № 5. – С. 106-110.

64 Разработка и технологический процесс производства трубных сталей в XXI веке / Ю.И. Матросов, Ю.Д. Морозов А.С. Болотов и др. // Сталь. – 2001. – № 4. – С. 58-62.

65 Пономарев, С.В. «Ключи» для газа. Единая система газоснабжения России / С.В. Пономарев // Российское предпринимательство. – 2002. – № 1. – С. 4.

66 Гедич, Т.Г. Влияние рынка СПГ на развитие газовой отрасли Иркутской области / Т.Г. Гедич // Нефть, газ и бизнес. – 2016. – № 11. – С. 42-49.

67 Рыбин, В.В. Структура и свойства хладостойких сталей для конструкций северного исполнения / В.В. Рыбин, В.А. Малышевский, Е.И. Хлусова // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 1 (45). – С. 24-44.

68 Эфрон, Л.И. Легирование и свойства высокопрочных свариваемых сталей, подвергаемых термомеханической обработке / Л.И. Эфрон, Д.А. Литвиненко // Сталь. – 1994. – № 8. – С. 65-73.

69 Хулка, К. Улучшенная система легирования и технология обработки высокопрочных конструкционных сталей / К. Хулка, Ф. Хайстеркамп // Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке: материалы международной конференции. – М.: Металлургия, 1994. – Т. 5. – С. 162-173.

70 Производство конвертерных сталей для изготовления электросварных труб большого диаметра и строительства магистральных газонефтепроводов: Обзор материалов по источникам научно-технической информации. – Маг-

нитогорк: ОАО «ММК». Центр подготовки кадров «Персонал». – 2002. – 190 с.

71 Эфрон, Л.И. Структурообразование при контролируемой прокатке и формирование комплекса повышенной прочности и хладостойкости экономнолегированных конструкционных сталей: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.01 / Л.И. Эфрон. – Москва, 1997. – 44 с.

72 Efron, L.I. Production of Cold-Resistant Pipe Steels / L.I. Efron, V/ Il'inskiy, A. Golovanov, Y. Morosov // Сталь. – 2003. – № 6. – С. 69-72.

73 Особенности разрушения трубных сталей класса прочности X80 (K65) / А.Б. Арабей, И.Ю. Пышминцев, В.М. Фарбер и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2012. – № 3. – С. 12-19.

74 Мазур, В.Л. Сопротивление деформации низколегированных сталей / В.Л. Мазур, Д.Д. Хижняк // Сталь. – 1991. – № 8. – С. 41-43.

75 Погоржельский, В.И. Производство экономичных видов проката и покрытий / В.И. Погоржельский // Научн. тр. МЧМ СССР. – М.: Металлургия, 1981, № 5. – С. 14-18.

76 Фундаментальная наука и металлургическое предприятие – стратегический альянс для инновационного развития / В.Ф. Рашников, А.А. Морозов, В.Н. Урцев и др. // Сталь. – 2005. – № 5. – С. 117-119.

77 Рашников, В.Ф. Научные разработки как основа программы инновационного развития ОАО «ММК» / В.Ф. Рашников // Сталь. – 2007. – № 2. – С. 10-12.

78 Рашников, В.Ф. Развитие технологических систем ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» для производства конкурентоспособного стального проката / В.Ф. Рашников // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2003. – № 1. – С. 8.

- 79 Сквозная технология производства проката в листах для судостроения на стане «5000». Технологическая инструкция ТИ-101-Я-543-2010. ОАО «ММК». – Магнитогорск, 2010. – 21 с.
- 80 Производство низколегированной стали для изготовления газонефтепроводных труб. Технологическая инструкция ТИ-101-Я-508-2011. ОАО «ММК». – Магнитогорск, 2011. – 30 с.
- 81 Явойский, В.И. Теория процессов производства стали / В.И. Явойский. – М.: Металлургия, 1967. – 448 с.
- 82 Баптизманский, В.И. Теория кислородно-конвертерного процесса / В.И. Баптизманский. – М.: Металлургия, 1975. – 375 с.
- 83 Еланский, Г.Н. Строение и свойства металлических расплавов. Учеб. пособие для вузов / Г.Н. Еланский. – М.: Металлургия, 1991. – 160 с.
- 84 Металлургия стали / В.И. Явойский, Ю.В. Кряковский, В.П. Григорьев и др. – М.: Металлургия, 1983. – 484 с.
- 85 Линчевский, Б.В. Теория металлургических процессов. Учеб. для вузов / Б.В. Линчевский. – М.: Металлургия, 1995. – 346 с.
- 86 Поволоцкий, Д.Я. Внепечная обработка стали. Учеб. для вузов / Д.Я. Поволоцкий, В.А. Кудрин, А.Ф. Вишкарёв. – М.: МИСиС, 1995. – 256 с.
- 87 Поволоцкий, Д.Я. Основы технологии производства стали. Учеб. пособие для вузов / Д.Я. Поволоцкий. – Челябинск: ЮУрГУ, 2004. – 191 с.
- 88 Кудрин, В.А. Теория и технология производства стали: Учебник для вузов / В.А. Кудрин. – М.: Мир, 2003. – 528 с.
- 89 Бигеев, А.М. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали: учебник для вузов, 3-е изд. перераб и доп. / А.М. Бигеев, В.А. Бигеев. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. – 544 с.
- 90 Еланский, Г.Н. Основы производства и обработки металлов: учебник / Г.Н. Еланский, Б.В. Линчевский, А.А. Кальменев. – М.: МГВМИ, 2005. – 416 с.

- 91 Лахтин, Ю.М. *Металловедение и термическая обработка металлов. Учеб. для вузов* / Ю.М. Лахтин. – М.: *Металлургия*, 1984. – 360 с.
- 92 *Schlackenatlas / Herausgegeben vom Verein Deutscher Eisenhüttenleute.* – Verlag *Stahleisen M.B.H.* – Düsseldorf, 1981.
- 93 *Производство стали на агрегате «ковш-печь»* / Д.А. Дюдкин, С.Ю. Бать, С.Е. Гринберг и др. – Донецк, ООО «Юго-Восток», 2003. – 300 с.
- 94 Якушев, А.М. *Справочник конвертерщика* / А.М. Якушев. – Челябинск: *Металлургия*, 1990. – 448 с.
- 95 *Технология производства стали в современных конвертерных цехах* / С.В. Колпаков, Р.В. Старов, В.В. Смоктий и др. М.: *Машиностроение*, 1991. 464 с.
- 96 Дюдкин, Д.А. *Современная технология производства стали* / Д.А. Дюдкин, В.В. Кисиленко. – М.: *Теплотехник*, 2007. – 528 с.
- 97 Дюдкин, Д.А. *Производство стали. Т. 1. Процессы выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки стали* / Д.А. Дюдкин, В.В. Кисиленко. – М.: *Теплотехник*, 2008. – 528 с.
- 98 Дюдкин, Д.А. *Производство стали. Т. 3. Внепечная металлургия стали* / Д.А. Дюдкин, В.В. Кисиленко. – М.: *Теплотехник*, 2008. – 544 с.
- 99 *Оценка степени десульфурации при обработке расплава в агрегате ковш-печь* / Р.А. Гизатулин, О.И. Нохрина, И.Д. Рожихина и др. // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 2011. – №2. – С. 21–23.
- 100 *Усовершенствование процесса десульфурации металла при использовании разных видов извести* / О.Л. Кучеренко, В.С. Зенина, И.В. Репина и др. // *Сталь.* – 2010. – № 1. – С. 44–47.
- 101 Новиков, В. К. *Полимерная природа расплавленных шлаков* / В.К. Новиков, В.Н. Невидимов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 62 с.
- 102 *Сульфидная емкость глиноземистых шлаков внепечной обработки стали и активность анионов кислорода* / О.Ю. Шешуков, И.В. Некрасов, С.Н. Бонарь и др. // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации.* – 2017. Вып. 2 (1406). – С. 30–32.

- 103 Атлас шлаков: справ. изд., пер. с нем. – М.: Metallurgia, 1985. – 208 с.
- 104 Drakalisky, E. An Experimental Study of Sulfide Capacities in the System CaO–SiO₂–Al₂O₃ / E. Drakalisky, Du Sichen, S. Seetharaman // Canadian Metallurgical Quarterly. – 1997. – V. 36. – № 2. – P. 115–120.
- 105 Шибанова, Л.Н. Физико-химические свойства сульфидно-оксидных расплавов и кинетика обменных взаимодействий на границе раздела с конструкционными материалами: автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра хим. наук. – Екатеринбург, 2000. – 34 с.
- 106 Кем, А.Ю. Разработка методики оценки технологических параметров процесса десульфурации стали в ковше / А.Ю. Кем, Е.Ю. Рощупкина, А.А. Кожухов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2020. – Т. 76. – №7. – С. 700–708.
- 107 Металлургия чугуна / Е.Ф. Вегман, Н.Ф. Жербин, А.Н. Похвиснев и др. / под ред. Ю.С. Юсфина – М.: Академкнига, 2004. – 774 с.
- 108 Рихтер, Й. Десульфурация и влияние на неметаллические включения в стали обработки кальцием / Й. Рихтер, Г. Фейнцке // Neue Hütte. – 1989. – №10. – P. 361–365.
- 109 Дюдкин, Д.А. Особенности комплексного воздействия кальция на свойства жидкой и твердой стали / Д.А. Дюдкин // Сталь. – 1999. – №1. – С. 20–25.
- 110 Санбонги, К. Регулирование формы сульфидов в стали с помощью редкоземельных металлов или кальция / К. Санбонги // Тэцу то хаганэ. – 1978. – Т.64. – №1. – С. 145– 54.
- 111 Ототани, Т. Кальцийсодержащая чистая сталь / Т. Ототани // Springer-Verlag. – 1986. (Пер. Черметинформация, № 16679). – 141 р.
- 112 Дубровский, Б.А. Развитие сталеплавильного производства в ОАО «ММК» / Б.А. Дубровский, Ю.А. Бодяев, А.В. Сарычев и др. // Труды десятого конгресса сталеплавильщиков. – М.: ОАО «Черметинформация», 2009. – С. 5 – 8.

- 113 Артамонов, А.В. Свойства извести центробежно-ударного измельчения / А.В. Артамонов, М.С. Гаркави М.С., Е.В. Колодежная // Строительные материалы. – 2014. – № 9. – С. 28-30.
- 114 Бигеев, В.А. Аспекты моделирования продувки металла газопорошковой струей / В.А. Бигеев, А.В. Брусникова, Ф.Г. Ибрагимов // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2011. – № 1-2. – С. 147-150.
- 115 Чуманов, И.В. Поиск оптимального метода построения математической модели процесса продувки жидкой стали порошком извести в струе аргона / И.В. Чуманов, А.Д. Иванин, А.А. Брусникова // Теория и технология металлургического производства. – 2014. – № 2 (15). – С. 63-66.
- 116 Конвертерная выплавка высококачественных трубных сталей / Ю.А. Бодяев, А.В. Сарычев, С.В. Мещеров и др. // Сталь. – 2002. – №1. – С. 14-15.
- 117 Разработка и освоение технологии производства новых марок стали в ККЦ / Б.А. Сарычев, С.В. Прохоров, О.А. Николаев и др. // Совершенствование технологии в ОАО «ММК»: Сб. науч. тр. Центральная заводская лаборатория ОАО «ММК». Вып. 16. – Магнитогорск: 2011. – С. 66–69.
- 118 Колесников, Ю.А. Металлургические технологии в высокопроизводительном конвертерном цехе: учебное пособие / Ю.А. Колесников, Б.А. Буданов, А.М. Столяров. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. – 379 с.
- 119 Освоение комплекса внепечной обработки стали и МНЛЗ №6 ОАО «ММК» / Б.А. Сарычев, Ю.А. Чайковский, О.А. Николаев и др. // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2011. – №2. – С. 42–45.
- 120 Литейно-прокатный комплекс металлургической компании «ММК-Metalurji» / С.Н. Ушаков, В.А. Бигеев, А.М. Столяров, А.Х. Валиахметов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. – 114 с.

121 Столяров, А.М. Мягкое обжатие слябов при разливке трубной стали на криволинейной МНЛЗ с вертикальным участком / А.М. Столяров, В.В. Мошкунов, А.С. Казаков. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. – 116 с.

122 Столяров, А.М. Непрерывная разливка стали. Машины непрерывного литья заготовок: учебное пособие / А.М. Столяров, В.Н. Селиванов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. – 193с.

123 Освоение технологии десульфурации чугуна в ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» / С.Н. Ушаков, Б.А. Сарычев, С.М. Добрынин и др. // Сборник трудов XV международного Конгресса сталеплавателей и производителей металла: Межрегиональная общественная организация «Ассоциация сталеплавателей». – Москва – Тула, 15–19 октября 2018. – С. 326–331.

124 Производство трубной низкосернистой стали с ковшовой десульфурацией чугуна / С.Н. Ушаков, В.А. Авраменко, В.А. Бигеев и др. // Металлург. – 2017. – №11. – С. 47-50.

125 Manufacture of Low-Sulfur Pipe Steel with Ladle Desulfurization of Cast Iron / S.N. Ushakov, V.A. Avramenko, V.A. Bigeev, A.M. Stolyarov, M.V. Potapova // Metallurgist. – 2018. – Т.61. – №11-12. – P. 967-970.

126 Современные процессы ковшовой десульфурации чугуна / С.Н. Ушаков, В.А. Бигеев, А.М. Столяров, М.В. Потапова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2019. – Т.17. – №2. – С. 17–23.

127 Ковшечная обработка стали с вдуванием флюидизированной извести / С.Н. Ушаков, В.А. Бигеев, А.М. Столяров, В.В. Мошкунов // Теория и технология металлургического производства. – 2016. – №2 (19). – С. 26–29.

128 Особенности производства конвертерной стали с ультранизким содержанием серы / С.Н. Ушаков, В.А. Бигеев, А.М. Столяров, А.Б. Сычков // Физи-

ко-химические основы металлургических процессов: сборник трудов Международной научной конференции, посвященной 115-летию со дня рождения академика А.М. Самарина. – Москва: ИМЕТ РАН, 14-15 ноября 2017 г. – С. 81.

129 Ковшовая десульфурация конвертерной трубной низкосернистой стали / С.Н. Ушаков, В.А. Бигеев, А.М. Столяров, М.В. Потапова // *Металлург.* – 2018. – №7. – С. 50-53.

130 Ladle Desulfurization of Converter Low-Sulfur Pipe Steel / S.N. Ushakov, V.A. Bigeev, A.M. Stolyarov, M.V. Potapova // *Metallurgist.* – 2018. – Т.62. – №7-8. – P. 667-673.

131 Влияние химического состава шлака на десульфурацию трубных марок стали на агрегате печь-ковш в ККЦ ПАО ММК / С.Н. Ушаков, В.А. Бигеев, Е.В. Соколова и др. // *Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XVIII Международной конференции.* – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2019. – Ч. 1. – С. 169-172.

132 Технология производства трубной ультранизкосернистой стали / С.Н. Ушаков, В.А. Бигеев, А.М. Столяров, М.В. Потапова // *Черные металлы.* – №12 (1056), декабрь 2019. – С. 26-31.

133 Ушаков, С.Н. Десульфурация стали на агрегате «ковш-печь» / С.Н. Ушаков // *Теория и технология металлургического производства.* – 2020. – №2 (33). – С. 4–10.

134 Особенности ковшевой десульфурации при производстве низкосернистой трубной стали / С.Н. Ушаков, В.А. Бигеев, А.М. Столяров и др. // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации.* – 2020. – Том 76. – №7. – С. 716–720.

ПРИЛОЖЕНИЕ А – СПРАВКА ИЗ ПАО «ЧТПЗ»

Публичное акционерное общество «Челябинский трубопрокатный завод»

454129, Россия, г. Челябинск, ул. Машиностроителей, 21
ОКПО 00186654, ОГРН 1027402694186, ИНН/КПП 7449006730/997450001

+7 351 273 33 33

chelpipe.ru



ЧТПЗ

25.08.2020 № 317М

На № _____ от _____

О листовом прокате DNV SAWL 485 FD

**Справка**

В период 2016-2018 гг. ПАО «ММК» изготовил и отгрузил в ПАО «ЧТПЗ» листовой прокат из стали марки DNV SAWL 485 FD толщиной 30,9мм в количестве 161 836т и толщиной 34,6мм в количестве 289 837т в соответствии с требованиями ТУ 14-101-944-2016, с химическим составом и механическими свойствами в соответствии с таблицами 1 и 2.

Таблица 1 – Химический состав стали

Элемент	Массовая доля элементов, %, факт
Углерод (С)	0,05
Марганец (Mn)	1,74
Кремний (Si)	0,096
Сера (S)	0,001
Фосфор (P)	0,007
Хром (Cr)	0,03
Никель (Ni)	0,39
Медь (Cu)	0,22
Алюминий (Al)	0,036
Молибден (Mo)	0,12
Ванадий (V)	0,004
Ниобий (Nb)	0,044
Титан (Ti)	0,019
Азот (N)	0,006
Бор (B)	0,0003
Сэkv.	0,41
Pcm	0,17
Nb+V+Ti	0,067

Настоящее письмо не является юридически обязывающим документом, не является предложением заключить предварительный договор по смыслу ст. 429 Гражданского кодекса РФ, договор о совместной деятельности, договор в порядке п. 2 ст. 434 Гражданского кодекса РФ, не является офертой, приглашением сделать оферты, принятием оферты, не является письмом о вступлении в переговоры, о заключении договора в соответствии с п. 2 ст. 434.1 Гражданского кодекса РФ. Информация из настоящего письма является конфиденциальной и не подлежит раскрытию третьим лицам и использованию иным ненадлежащим образом без согласия ПАО «ЧТПЗ».

Таблица 2 – Механические свойства листового проката

Ориентация образцов к оси проката	Предел прочности на разрыв R_m , МПа	Предел текучести $R_{10,5}$, МПа	Относительное удлинение A_{2^0} , %	$R_{10,5} / R_m$
<i>Поперечные</i>	630	560	58	0,89
<i>Продольные</i>	598	532	60	0,89

Вышеуказанный листовой прокат был успешно использован при изготовлении труб большого диаметра по проекту газопровода «Северный поток - 2».

Начальник управления технологии ТБД



А.И. Романцов

Настоящее письмо не является юридически обязывающим документом, не является предложением заключить предварительный договор по смыслу ст. 429 Гражданского кодекса РФ, договор о совместной деятельности, договор в порядке п. 2 ст. 434 Гражданского кодекса РФ, не является офертой, приглашением делать оферты, принятием оферты, не является письмом о вступлении в переговоры, о заключении договора в соответствии с п. 2 ст. 434.1 Гражданского кодекса РФ. Информация из настоящего письма является конфиденциальной и не подлежит раскрытию третьим лицам и использованию иным ненадлежащим образом без согласия ПАО «ЧТПЗ».

**ПРИЛОЖЕНИЕ В – КАЛЬКУЛЯЦИЯ СЕБЕСТОИМОСТИ
1 Т НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО СЛЯБА ИЗ
СТАЛИ МАРКИ DNV SAWL 485 FD**

Параметр	Размерность	Расход	Стоимость, руб.	Затраты, руб.
Жидкий чугун	т	0,9469	13870,029	13133,53
Стальной лом	т	0,2325	13892,172	3229,93
Медный лом	т	0,0021	402771,43	845,82
Ферросплавы и раскислители	т	0,0324		9605,9
Флюсы и добавочные материалы: в том числе флюидизированная известь	т	0,1356		521,36
	т	0,0036	12105,556	43,58
Отходы (реализуемые)	т	0,2139		-969,9
Расходы прямые и по переделу				2495,3
Итого				28861,94