

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(национальный исследовательский университет)»
Филиал в г. Златоусте
Факультет «Техники и технологии»
Кафедра «Техника и технологии производства материалов»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
проф., д.т.н. И.В. Чуманов

«__» _____ 2021 г

Разработка оптимальной технологии выплавки и внепечной обработки стали
марки 4Х5МФС

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

22.03.02.2021.307.00.00 ПЗ ВКР

Технический контролер
_____ доц., к.т.н. А.В. Рябов
«__» _____ 2021 г.

Руководитель проекта
_____ доц., к.т.н. А.Н. Дильдин
«__» _____ 2021 г.

Автор проекта
студент группы ФТТ-534
_____ А.О.Крюкова
«__» _____ 2021 г.

Нормоконтролер
_____ инженер В.В. Седухин
«__» _____ 2021 г.

Златоуст 2021

22.03.02.2021.307.00.00 ПЗ ВКР

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лит.	Лист	Листов
Разраб.		Крюкова А.О					
Провер.		Дильдин А.Н.				6	93
Н. Контр.		Седухин В.В.			ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ)		
Утверд.		Чуманов И.В.					

«Разработка оптимальной технологии
выплавки и внепечной обработки ста-
ли марки 4Х5МФС»

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Технология выплавки стали марки 4Х5МФС	6
1.1 Назначение и химический состав стали марки 4Х5МФС	6
1.2 Метод выплавки стали марки 4Х5МФС	7
1.3 Общие положения выплавки	7
1.4 Требования к электродуговой печи	8
1.5 Очистка и заправка печи	8
1.6 Расчет шихтовых материалов на плавку	9
1.7 Завалка шихтовых материалов в печь	9
1.8 Плавление	9
1.9 Окислительный период	11
1.10 Внепечная обработка стали на установке печь-ковш	11
1.11 Выпуск металла	14
1.12 Разливка стали	14
1.13 Техника безопасности	14
2 Расчет материального баланса плавки	15
2.1 Расчет шихты	15
2.2 Расчет материального баланса периода плавления	16
2.3 Расчет материального баланса окислительного периода	26
2.4 Расчет материального баланса в агрегате печь-ковш	33
3 Маркетинговое исследование	39
3.2 Состояние рынка штампового инструмента в России	40
3.3 Оценка в потребности и производстве стали марки 4Х5МФС	44
4 Влияние неметаллических включений на свойства стали	48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	75
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	76
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Презентационные материалы	85

										Лист
										3
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР					

ВВЕДЕНИЕ

Металлургический комплекс – это основа индустрии. Он является фундаментом машиностроения, обеспечивающего вместе с электроэнергетикой и химической промышленностью развитие научно-технического прогресса во всех звеньях народного хозяйства страны. Metallургия относится к числу базовых отраслей народного хозяйства и отличается высокой материалоемкостью и капиталоемкостью производства. На долю черных и цветных металлов приходится более 90 % всего объема конструкционных материалов, применяемых в машиностроении России. В общем объеме транспортных перевозок Российской Федерации на металлургические грузы приходится свыше 35 % всего грузооборота. На нужды металлургии расходуется 14 % топлива и 16 % электроэнергии, т.е. 25 % этих ресурсов, расходуемых в промышленности.

Состояние и развитие металлургической промышленности в конечном итоге определяют уровень научно-технического прогресса во всех отраслях народного хозяйства. Metallургический комплекс характеризуется концентрацией и комбинированием производства.

Исключительно велико комплексобразующее и районообразующее значение металлургического комплекса в территориальной структуре народного хозяйства России.

Современные крупные предприятия металлургического комплекса по характеру внутренних технологических связей представляют собой металлургическо-энергетические комбинаты.

Новые концепции получения «чистой» стали, непрерывной разливки, технологии и оборудования для станов, выпускающих прутки и катанку; современных станов новой конструкции для прокатки листов и полос широкого сортамента; мини – заводов по производству холоднокатаной листовой продукции, выпуск которой открывает широкие возможности для выхода на региональный потребительский рынок (профилированный настил, гнутые профили, электросварные трубы, метизы, и многое другое) – открывают большие возможности для начала структурной перестройки российской металлургии практически по всем направлениям производства металлопродукции.

На протяжении всей истории металлургии перед металлургами стоит задача улучшения качества металла и прежде всего получения металла, не содержащего вредных примесей (серы, фосфора, газов, примесей цветных металлов, неметаллических включений и т.п.) и с необходимой структурой. Развитие таких отраслей техники, как авиакосмическая, атомная, энергетическая и ряда других, во многом определяется состоянием и техническим уровнем производства легированных сталей и сплавов, способных работать в самых разнообразных условиях. Современная техника нуждается в материалах, надежно работающих как при температуре, близкой к абсолютному нулю, так и температуре в несколько тысяч градусов, при знакопеременных и вибрационных нагрузках, под воздействием радиоак-

										Лист
										4
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР					

тивных излучений, в агрессивных средах, в условиях глубокого вакуума и резких перепадов температуры.

Решение этих задач потребовало, во-первых, конкретного улучшения качества производимых сталей и сплавов и, во-вторых, создания новых материалов. Традиционными методами выплавки и разливки в ряде случаев нельзя получить металл требуемого качества. Взаимодействие жидкой стали в процессе выплавки и разливки с огнеупорными материалами, шлаком и атмосферой неизбежно приводит к значительному загрязнению металла неметаллическими включениями и газами. Затвердевание металла в чугунных изложницах сопровождается дефектами кристаллизационного (усадочные раковины, пористость, трещины и т.д.) и ликвационного происхождения.

Создание высокопроизводительных и стойких в эксплуатации инструментов связано, в первую очередь, с проблемой получения и обработки таких материалов, которые могли бы противостоять жестким условиям работы. Высокие механические свойства инструмента и его теплостойкость (красностойкость) достигаются специальным легированием и термической обработкой.

Сталь 4X5МФС является инструментальной штамповой. Из нее изготавливают молотовые штампы (мелкие), прессовые, молотовые вставки (крупные более 200 мм) при горячем деформировании цветных сплавов, конструкционных сталей в условиях массового, крупносерийного производства, пресс-формы литья под давлением магниевых, цинковых, алюминиевых сплавов.

Характерной особенностью стали 4X5МФС является комплексное легирование и склонность к дисперсионному твердению. Высокий уровень легирования благоприятно влияет на прочность, прокаливаемость, теплостойкость стали и дает возможность использовать ее для инструментов, разогревающихся в процессе работы до 600 °С.

Ввиду многочисленных и разнообразных требований, предъявляемых к штампам в зависимости от назначения, для их изготовления применяют стали различных марок, начиная от простых углеродистых и заканчивая сложно легированными.

В данной работе рассмотрены и проанализированы существующие положения о процессах образования неметаллических включений в жидком и затвердевающем металле, представлены математические модели этих процессов. Приведён обзор применяемых технологий позволяющих получить металл с низким содержанием неметаллических включений на основе стали марки 04X5МФС.

					220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

1 Технология выплавки стали марки 4X5MФC

1.1 Назначение и химический состав стали марки 4X5MФC

Эксплуатационные условия изделий из этого сплава, а также точный химический состав материала прописаны в нормативах ГОСТ 5950-2000.

Химический состав стали марки 4X5MФC должен быть в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1 - Химический состав стали марки 4X5MФC ГОСТ 5950-2000

В процентах

C	Si	Cr	Mn	Mo	V	S	P	Cu	Ni
0,32	0,90	4,50	0,20	1,20	0,30	не более			
0,40	1,20	5,50	0,50	1,50	0,50	0,030	0,030	0,30	0,35

Сталь 4X5MФC представляет собой инструментальную штамповую сталь. Это высококачественный сплав наиболее чистый по содержанию в своем составе фосфора, серы и различных примесей других веществ. Что делает сталь марки 4X5MФC более устойчивой к механическим повреждениям и ударным нагрузкам.

Из этого стали поставляют сортовой и фасонный прокат, шлифованные и калиброванные прутки, серебрянки, стальные полосы, а также кованные заготовки и поковки. Российскими аналогами данного материала являются стали 4X5MФ1C и 4X4BMФC.

Изделия, в производстве которых участвует сталь 4X5MФC, активно используют в современной промышленности. Здесь они представлены в виде:

- пресс-форм для литья алюминиевых, магниевых и цинковых сплавов;
- крупных прессовых и молотовых вставок,
- мелких молотовых штампов.

Сталь 4X5MФC благодаря комплексному легированию хромом, ванадием, молибденом и кремнием, относится к группе сталей повышенной теплостойкости и вязкости. Марка 4X5MФC сохраняет удовлетворительный уровень прочности при длительном нагреве не выше 590 градусов Цельсия и характеризуется высокотемпературной вязкостью - свойством, которое позволяет избежать горячего растрескивания, т.е. трещин, возникающих вследствие напряжений, которые в первую очередь развиваются в инструментах с глубокими полостями на внутренних углах и на ребрах, и распространяются в глубину (в противоположность разгарной сетки)[1].

Сталь 4X5MФC склонна к вторичному твердению. Максимум твердости (50ед по Роквеллу) достигается при температуре отпуска 500 градусов по Цельсию. Вторичное твердение возникает за счет выделения карбидов легирующих элементов. Наиболее карбидообразующими элементами являются (в порядке убывания) ванадий, молибден и хром. Вторичное твердение карбидным упрочнением сопря-

жено как с повышением прочностных характеристик стали, так и с понижением ударной вязкости.

Как и любая сталь, марка 4X5МФС подвергается обязательной термической обработке. Эта процедура проводится для улучшения технических и механических свойств материала.

Проходит она в несколько этапов. Прежде всего, в ходе термообработки сталь закаливают при температуре +1020°C. Далее ее отпускают при +560°C, и наконец, повторный отпуск при показании термометра 520°C.

Начальной температуройковки для этого сплава является +1180°C, конечной - 850°C. Затем следует замедленное охлаждение в специальных колодцах.

Температура критических точек достигается при следующих параметрах:

- $A_{c1} = 840^\circ$
- $A_{c3}(A_{cm}) = 870^\circ$
- $A_{r3}(A_{rcm}) = 810^\circ$
- $A_{r1} = 735^\circ$
- $M_n = 300^\circ$

После заковки материал приобретает повышенные показатели прочности и твердости. Твердость сплава по Бринеллю составляет $10^{-1} = 241$ МПа.

Таблица 2 - Виды поставки материала 4X5МФС

Сортовой и фасонный прокат	ГОСТ 1133-71; ГОСТ 2590-2006; ГОСТ 2591-2006
Болванки. Заготовки. Слябы	ГОСТ 7831-78
Сортовой и фасонный прокат	ГОСТ 1051-73; ГОСТ 8559-75; ГОСТ 7417-75; ГОСТ 5950-2000; ГОСТ 8560-78; ГОСТ 14955-77
Листы и полосы	ГОСТ 4405-75

1.2 Метод выплавки стали марки 4X5МФС

Выплавку данной марки стали производим методом переплава легированных отходов с окислением газообразным кислородом.

Схема выплавки ДСП-10 – Печь-ковш – разливка сифоном.

1.3 Общие положения выплавки

Химический состав стали 4X5МФС должен быть в соответствии с ГОСТ 5950-2000.

Выплавка исходного металла должна производиться методом переплава легированных отходов с окислением кислородом в электродуговой печи номинальной емкостью 12 тонн.

1.4 Требования к электродуговой печи

Выплавка должна производиться в печи с хорошим или удовлетворительным состоянием подины, откосов, стен, свода, желоба, выпускного отверстия, охлаждающей арматуры, механического и электрического оборудования.

Требования к металлу перед выпуском в ковш должны удовлетворять следующим требованиям:

- металл выплавляемой марки стали по химическому составу доведен в печи, за исключением случаев, когда доводка химического состава производится в ковше;
- температура металла в печи соответствует установленным пределам для данной марки стали (1570...1616 °С);
- металл, налитый в стаканчик, перед выпуском дает усадку;
- степень раскисленности шлака соответствует установленным визуальным признакам, а его жидкоподвижность обеспечивает сход вместе с металлом, за исключением случаев, когда по технологии выпуск или начало выпуска металла должны производиться без шлака.

1.5 Очистка и заправка печи

После выпуска металла в ковш необходимо сразу же произвести очистку откосов при помощи баклуш (гребков по необходимости), после чего приступить к заправке откосов и подины заправочными материалами.

Заправка откосов и подины не очищенных от остатков шлака и металла запрещается.

В качестве заправочных материалов следует применять периклазовый (магнетитовый) порошок, фракцией 5 мм; обожженный доломит – до 10 мм, хромопериклазовую крупку («половье») – до 10 мм, получаемую в результате дробления и помола отходов хромопериклазового кирпича.

Заправку печи следует производить:

- периклазовым порошком – для выплавки различных марок стали и сплавов, методом выплавки.
- хромопериклазовой крупкой в смеси с периклазовым порошком в соотношении 1:1-1:3, в данном случае содержание «половья» допускается больше (в зависимости от содержания хрома в стали).

При значительных повреждениях откосов допускается их заправка смесью периклазового порошка и жидкого стекла в соотношении 10:1.

При значительных повреждениях подины, слой заправки следует закрыть слоем извести.

После заправки печи необходимо осмотреть состояние выпускного отверстия и желоба и принять меры к приведению их в надлежащее состояние, а также осмотреть состояние стен, свода и, при необходимости, в дальнейшем произвести их ремонт.

					220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

1.6 Расчет шихтовых материалов на плавку

Перед завалкой шихты в печь, мастер по плавке обязан записать химический состав ферросплавов, шихты, номера вагонов или автомобилей с шихтой, номера корзин, произвести в плавильной карте расчет элементов, вносимых составляющими металлошихты.

Расчетное содержание углерода в металле перед продувкой кислородом должно быть в пределах 1,70...1,90 %.

Содержание в металлошихте элементов не удаляемых в процессе выплавки металла не должно превышать значений заданного химического состава.

При расчете мастер должен знать химический состав шихтовых материалов и руководствоваться следующими требованиями (переплав кислородом):

- содержание углерода по расплавлению шихты, вносимое металлошихтой и углеродосодержащими добавками (ферросплавами, электродным боем, крупкой, кусковым коксом из расчета не более 15 кг/т, огарками угольной футеровки, алюминиевых электролизеров не более 20 кг/т) должно быть 1,30...1,60 %;

- масса металлошихты, которая будет присаживаться в металл после продувки кислородом, должна определяться из расчета 50...200 кг/т шихты в завалке.

Перед завалкой производится осмотр электродов. Электроды должны быть без ниппельных гнезд и трещин.

1.7 Завалка шихтовых материалов в печь

Перед началом завалки сталевар обязан принять от бригадира (мастера) шихтового пролета точное количество и местонахождение мульд (корзины) с шихтой и мульд с ферросплавами, предназначенными для завалки и ведения плавки, записать их количество (номер корзины) в плавильную карту.

Сталевары обязаны перед завалкой ознакомиться с состоянием погрузки шихты в корзину, не допускается наличие выступающих за ее края концов и свешивания стружки. При опускании корзины в печь необходимо следить, чтобы корзина не раскачивалась и не задевала стенки печи. Затвор печи следует открывать на высоте ее нижней части не более 0,5 м от подины.

Углеродосодержащие добавки следует присаживать на подину печи в «колодцы» по электроды в первой половине плавления.

После завалки шихты песочный затвор должен быть очищен от стружки и мусора и плотно перекрывать зазор между сводом и верхом печи.

Присадку шлакообразующих в завалку следует производить после завалки первой порции мелкой шихты, причем часть смеси (не более 1/3) дается на подину печи перед завалкой, а оставшаяся смесь присаживается в первые 20-30 минут плавления в «колодцы».

1.8 Плавление

После завалки шихты перед включением печи сталевар совместно с дежурным персоналом службы механика и электрика обязан осмотреть и проверить исправ-

					220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

ность систем водяного охлаждения, отводов газа из печи, механического и электрического оборудования и произвести опрессовку водоохлаждаемой арматуры, о чем делается соответствующая отметка в плавильной карте.

Перед включением печи необходимо проверить состояние (наличие сколов, трещин, качество ниппельных гнезд) и длину электродов. Электроды должны быть без видимых повреждений, а их длина обеспечивать проведение всей плавки без наращивания. При необходимости замену электродов или их наращивание следует производить перед включением печи после завалки шихты или в начале периода плавления.

Включение печи на плавках «переплавом с кислородом» особенно низкоуглеродистой стали при наличии трещин и сколов на конце хотя бы одного электрода, ниппеля или ниппельного гнезда не допускается.

Плавление шихтовых материалов следует производить на максимальной мощности трансформатора.

Выпускное отверстие печи должно быть заделано в первые 20 мин плавления.

Порог завалочного окна следует заправлять в первой половине плавления, при этом высота заправочных материалов должна обеспечивать уровень жидкого металла и шлака не выше нижнего уровня выпускного отверстия при нормальном положении печи.

В процессе плавления шихту и ферросплавы следует периодически стаскивать с откосов в жидкий металл или в середину ванны, поднимая электроды, когда эта операция грозит их поломкой.

Перемешивание жидкого металла следует производить ошлакованными гребенками после стаскивания кусков шихты и погружения их в металл в следующей последовательности: в начале шлак разгоняется гребком в ту или другую сторону (как правило от первого электрода ко второму) и после образования на нем пленки шлака, гребок с силой погружается на возможно большую глубину в направлении от завалочного окна к заднему откосу и обратно.

Допускается применять газообразный кислород при давлении не более 8 кгс/см² после расплавления не менее 80 % шихты (определяется визуально мастером и сталеваром) в течении 10...15 мин при включенной печи.

После расплавления шихты и перемешивания металла не меньше чем двумя гребками следует отобрать пробу на химический анализ.

Содержание углерода в первой пробе должно быть в пределах 1,50...1,70 %.

В случае низкого содержания углерода по расплавлению следует снять шлак, произвести науглероживание металла и после наведения шлака отобрать повторную пробу на углерод.

Периодом плавления считается время от момента включения печи после завалки шихты до момента получения содержания углерода 1,30...1,60 % и, при необходимости, других элементов, удовлетворяющих требованиям проведения следующего периода плавки, и начала подачи кислорода в металл.

					220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

1.9 Окислительный период

Продувку металла кислородом следует начинать при содержании углерода 1,30...1,60 % по расплавлению шихты, обеспечивающим его окисление за время продувки в пределах 0,25 %.

Давление кислорода во время продувки металла должно быть не менее 7 кгс/см².

Вторую пробу на химический анализ следует отбирать во время продувки сразу после появления пламени в печи.

Продувка прекращается по достижении содержания углерода не более 1,15 %, что обеспечивает проведение легирования, и получения заданного химического состава стали.

Отбор проб металла после продувки кислородом следует производить сразу по окончании продувки.

После продувки и отбора проб, в металл вводится на рукоятке кусковой алюминий из расчета 1 кг/т. Затем присаживается шихта выплавляемой или близких по химическому составу марок стали до 20 кг/т, затем феррохром, известь 10...20 кг/т и раскислители из расчета: до 10 кг/т кускового 45 % ферросилиция (ферросиликохрома ФСХ40) или до 5 кг/т порошка 65...75 % ферросилиция и 1...2 кг/т порошка алюминия. Все раскислители должны присаживаться в смеси с известью в соотношении 1:1. После расплавления раскислительных смесей окислительный шлак полностью снимается и наводится известково-глиноземистый [2].

1.10 Внепечная обработка стали на установке печь-ковш

Все ферросплавы и шлакообразующие материалы должны быть воздушно сухими.

При подготовке установки ковш-печь к приёму плавки необходимо проверить:

- исправность всех механизмов, органов управления установки и блокировок;
- исправность и работоспособность весов сталевоза;
- работоспособность донных пробок для продувки металла аргоном;
- состояние электродов и электрододержателей;
- обеспечение установки электроэнергией и аргоном;
- работоспособность системы бункеров и наличия в них ферросплавов и других материалов;
- работоспособность трайб-аппаратов;
- наличие пробоотборников и термопар.

Мостовым краном сталеразливочный ковш подают на сталевоз, подручный сталевар установки внепечной обработки стали подсоединяет аргонопровод, и сталевар установки внепечной обработки стали начинает подачу аргона через пробки в днище сталеразливочного ковша.

После приёма плавки в сталеразливочный ковш и установки его в рабочую позицию «печь-ковш» для предотвращения подсоса атмосферного воздуха, свод установки ковш-печь должен плотно лежать на сталеразливочном ковше.

					220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

Возникающие течи воды из водоохлаждаемых элементов установки печь-ковш должны немедленно устраняться в промежутках между плавками.

При попадании в печь-ковш печного шлака в количестве, превышающем 1/2 части от массы шлакообразующих (контролируется визуально), сразу после выпуска плавки, производится слив излишков шлака через край сталеразливочного ковша в шлаковую чашу или аварийную ёмкость. Слив шлака производится под наблюдением персонала участка внепечной обработки или раздаточного пролёта.

Интенсивность продувки металла аргоном выбирается таким образом, чтобы не оголялось зеркало металла из-под шлака. Расход аргона составляет от 15 м³/час до 35 м³/час. Наибольший расход соответствует времени присадки ферросплавов и науглероживателя. В этот период допускается оголение зеркала металла из-под шлака.

Количество шлака должно обеспечивать незначительное оголение металла в зоне продувки (продувочное пятно не более 0,5 м в диаметре для принятой интенсивности продувки), устойчивое и бесшумное горение дуг, защиту водоохлаждаемых элементов установки от прямого излучения дуг, теплоизоляцию металла и удовлетворительное проведение технологического процесса. Наведение рафинирующего шлака производят присадками порошкообразной извести, комовой извести и плавикового шпата в количестве. Количество присаживаемых шлакообразующих зависит от необходимого конечного химического состава и должно согласовываться с нормами расхода на каждую конкретную марку стали. Для повышения стойкости футеровки ковшей перед внепечной обработкой допускается присадка магнетитового порошка в количестве до 40 кг/плавку. С целью ускорения процесса внепечной обработки, экономии шлакообразующих материалов, допускается производить долив шлака из ковша после разливки стали. Отсев извести и комовой извести допускается использовать в случаях отсутствия порошкообразной извести или неудовлетворительного ее качества.

Основным шлакообразующим материалом является порошкообразная известь фракции 0...10 мм. Присадка порошкообразной извести производится через пневмокамерную установку. Максимальная разовая порция не должна превышать 250 кг. С целью ускорения процессов формирования рафинировочного шлака и десульфурации допускается увеличивать разовую порцию порошкообразной извести до 300 кг, при удовлетворительной продувке аргоном. Требования к порошкообразной извести: содержание CaO+MgO должно быть не менее 90...92 %, MgO не более 6 %, SiO₂ не более 2,0 %, S не более 0,06 %, P не более 0,10 %, фракция материала 0...10 мм.

Произвести раскисление шлака. Использовать порошок кокса, инжестируемый на поверхность шлака с помощью пневмокамерной установки равномерно по всему зеркалу шлака порциями 10...100 кг в зависимости от заданного содержания углерода в выплавляемой марке стали. Для более глубокого раскисления рафинировочного шлака допускается использовать чушковый, гранулированный, порошкообразный алюминий [3].

Допускается использовать в качестве раскислителя шлака кусковой силикокальций фракции 10...50 мм, а также проволоку с порошкообразным наполните-

										Лист
										12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР					

лем – SiCa, FeCa, C в количествах, обеспечивающих наведение хорошо раскисленного белого шлака.

Поскольку шлак не может быть оперативно проанализирован на химический состав, необходимо ориентироваться на другую информацию, которая основана на визуальной оценке внешнего вида шлака.

Проба шлака отбирается посредством погружения на глубину, не превышающую толщину шлакового расплава металлического стержня либо трубки (например: длиной до 2,5м и диаметром 15...20 мм). Длительность погружения 1...2 секунды. Оценка проводится по остывшей пробе шлака.

Произвести отбор пробы металла №1. После получения анализа химического состава произвести, при необходимости, корректировку содержания углерода, кремния и марганца из расчета получения целевого значения.

Дальнейшую обработку металла необходимо вести исходя из следующих требований: конечное рекомендуемое содержание серы, должно быть:

- не более рекомендуемого значения, оговоренного в технологической карте и соответствующем приложении к ней для данной марки стали;
- должно быть обеспечено поддержанием основности и окисленности шлака в необходимых пределах присадками порошкообразной или комовой извести и раскислением шлака.

При необходимости производятся повторные корректировки химического состава металла по углероду, марганцу и кремнию по результатам анализа пробы № 2 (3), отбираемых через 5 или 10 мин (в зависимости от количества присаживаемых ферросплавов).

Окончательную корректировку по содержанию углерода, марганца и кремния, вне зависимости от количества присаживаемых ферросплавов производить не позднее, чем за 10 мин до окончания доводки стали.

За 6...8 мин до окончания доводки нагреть металл на 3...5 °C выше рекомендуемой температуры в ковше, отключить дуговой подогрев и ввести с помощью трайб-аппаратов SiCa или FeCa проволоки. При необходимости корректировки содержания кремния на 0,01...0,02 % допускается замена феррокальциевой проволоки на силикокальциевую.

Во время введения любого из видов проволоки с порошкообразным наполнителем интенсивность продувки металла устанавливается минимальной для исключения выноса непрореагировавшей проволоки на поверхность металла или в шлак.

Подогрев металла во время и после ввода любого из видов проволоки исключается. Количество вводимой SiCa и FeCa - проволоки определяется исходя из остаточного содержания Al в последней пробе. После ввода SiCa - проволоки продувка металла осуществляется в течение 2...3 минут без оголения зеркала металла.

После окончания продувки и извлечения фурмы из ковша произвести измерение температуры стали, которая должна быть 1520±5 °C. После получения температуры в необходимых пределах для данной марки стали в ковш, для утепления,

							220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				13

даётся вермикулит, который должен закрывать всю поверхность металла. Также для утепления и наводки шлака после обработки на печь-ковше даётся шамот с расходом до 5 кг/т. Ковш с металлом вывозится из под стенда печь-ковша, накрывается теплоизолирующей крышкой и передаётся на участок разливки [4,5].

Порядок введения раскислителей и легирующих

Кремний.

Легирование предварительно раскисленного металла, дающего усадку, осуществляем ферросилицием. Кусковой ферросилиций 3 класса крупности присаживается в ковш, через 5 минут необходимо тщательное перемешивание металла. Порошок ферросилиция присаживается вдуванием в печь-ковш в конце восстановительного периода для более полного раскисления шлака и корректировки состава металла.

Марганец.

Легирование расплава можно производить кусковым ферромарганцем, присаживая его в восстановительный период на дно ковша при выпуске нераскисленного металла из печи. Крупность кусков не более 60 мм.

Хром.

Для легирования применяем феррохром кусковой. Присаживаем в ковш с металлом одновременно с наведением восстановительного шлака в предварительно раскисленный металл. Феррохром должен присаживаться в прокаленном докрасна состоянии. Возможно, также применение металлического хрома.

1.11 Выпуск металла

Выпуск производится в подогретый ковш.

Выпуск металла производится со шлаком. Шлак должен покрывать всю поверхность металла в ковше. Температура металла в ковше должна быть 1530-1570 °С.

Металл в ковше продувается аргоном не менее 3 минут.

Температура металла в ковше должна быть:

- до продувки аргоном – 1550-1570 °С;
- после продувки аргоном – 1530-1550 °С.

1.12 Разливка стали

Разливка стали ведется сифонным методом в изложницы.

1.13 Техника безопасности

При выполнении работ, связанных с подготовкой и использованием материалов, механизмов электропечи, инструмента и приспособлений, а также выполнении технологических операций при выплавке металла в электропечи и выпуске его в ковш, должны соблюдаться требования инструкции по безопасности труда для сталевара и подручного сталевара [6,9,12].

					220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

2 Расчет материального баланса плавки

2.1 Расчет шихты

Таблица 3 – Химический состав отходов, которые предполагается использовать в завалку

Наименование отходов	В процентах						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
4X5МФС	0,380	1,000	0,350	0,020	0,018	5,000	0,180
Б60	0,350	1,000	0,400	0,018	0,015	5,000	0,350
Б24	0,270	1,300	0,350	0,018	0,010	10,000	0,300
кокс	88,000	0,000	0,000	0,000	0,500	0,000	0,000

Продолжение таблицы 3

Наименование отходов	В килограммах						
	Ti	Al	W	Mo	V	Cu	Fe
4X5МФС	0,010	0,010	0,060	1,350	0,450	0,150	91,022
Б60	0,010	0,030	0,080	1,300	0,400	0,200	90,847
Б24	0,100	0,030	0,050	0,500	0,050	0,150	86,872
кокс	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	11,500

Таблица 4 – Содержание компонентов в шихте

Наименование отходов	Масса, кг	В килограммах						
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
4X5МФС	2500,000	9,500	25,000	8,750	0,500	0,450	125,000	4,500
Б60	8950,000	31,325	89,500	35,800	1,611	1,343	447,500	31,325
Б24	1000,000	2,700	13,000	3,500	0,180	0,100	100,000	3,000
кокс	50,000	44,000	0,000	0,000	0,000	0,250	0,000	0,000
ИТОГО кг	12500,000	87,525	127,500	48,050	2,291	2,143	672,500	38,825
ИТОГО %	100,000	0,700	1,020	0,384	0,018	0,017	5,380	0,311

Продолжение таблицы 4

Наименование отходов	В килограммах						
	Ti	Al	W	Mo	V	Cu	Fe
4X5МФС	0,250	0,250	1,500	33,750	11,250	3,750	2275,550
Б60	0,895	2,685	7,160	116,350	35,800	17,900	8130,807
Б24	1,000	0,300	0,500	5,000	0,500	1,500	868,720
кокс	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ИТОГО кг	2,145	3,235	9,160	155,100	47,550	23,150	11275,077
ИТОГО %	0,017	0,026	0,073	1,241	0,380	0,185	90,201

Таблица 5 – Состав шлакообразующих и огнеупорных материалов

В процентах

Материал	CaO	SiO ₂	MgO	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaF ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	Потери
Известь	92	2	1	-	-	-	-	-	-	5
Магнезитохромитовый порошок	22	12	60	2	-	4	-	-	-	-
Плавленый шпат	0,5	3,6	-	-	0,2	1,5	94	-	-	0,2
Электрод	0,118	0,565	-	-	0,317	-	-	-	-	[C]=99
Магнезитовый порошок	8	4,5	85	-	-	2,5	-	-	-	-

Таблица 6 – Химический состав легирующих раскислителей, которые были использованы при выплавке стали

В процентах

Материал	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	W	Mo	Ca	Cu	Al	Fe
ФС65	-	65,00	0,40	0,05	0,02	0,40	-	-	-	-	-	2,00	32,13
ФМн 88	2,00	3,00	88	0,1	0,02	-	-	-	-	-	-	-	6,88
ФМо60	0,05	0,80	-	0,05	0,10	-	-	-	60	-	-	-	39,00
ФХ 100	0,78	1,45	-	0,02	0,02	72,50	-	-	-	-	-	-	25,23
А 97	-	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99,98	0,01

2.2 Расчет материального баланса периода плавания

Окисление элементов.

Расчёт поступивших в шлак продуктов окисления металлического расплава производим на основании данных по угару элементов и составляем таблицу угаров для данной марки в период плавания для всех элементов, входящих в таблицу 7.

Таблица 7 - Угары элементов при выплавке стали в ДСП в период плавания

В процентах

Угар	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	W	Al	Mo	Cu	V	Fe
Общий	20,0	100,0	70,0	0	0	15,0	2,0	100,0	0	100,0	0	0	0	2,0
В шлак	0	100,0	80,0	0	0	80,0	0	100,0	0	100,0	0	0	0	20,0
В улёт	100,0	0	20,0	0	0	20,0	100,0	0	0	0	0	0	0	80,0

Окисление элементов и ожидаемый химический состав металла по расплавлению шихты представлен в таблице 8.

Расчёт величин, приведённых в таблице, на примере углерода.

Исходное содержание – 87,525 кг (таблица 4);

Угар элемента – $87,525 \cdot 20/100 = 17,505$ кг,

где 87,525-исходное содержание, 20 - общий угар элемента;

Масса элемента в расплаве - $87,525 - 17,505 = 70,02$ кг;

Содержание элемента в расплаве – $70,02 \cdot 100/11983,077 = 0,584$ %,

Лист

220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР

16

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

где 70,02 - масса элемента в расплаве, кг;
11983,077- суммарная масса расплава, кг.

Таблица 8 - Химический состав металла по расплавлению шихты

В килограммах

Элемент	Исходное содержание	Угар элемента	Масса элемента в расплаве	Содержание элемента в расплаве, %
C	87,525	17,505	70,020	0,584
Si	127,500	127,500	0,000	0,000
Mn	48,050	33,635	14,415	0,120
P	2,291	0,000	2,291	0,019
S	2,143	0,000	2,143	0,018
Cr	672,500	100,875	571,625	4,770
Ni	38,825	0,777	38,049	0,318
Ti	2,145	2,145	0,000	0,000
Al	3,235	3,235	0,000	0,000
W	9,160	0,000	9,160	0,076
Mo	155,100	0,000	155,100	1,294
V	47,550	0,000	47,550	0,397
Cu	23,150	0,000	23,150	0,193
Fe	11275,077	225,502	11049,575	92,210
ИТОГО	12500,000	511,173	11983,077	100,000

Расчёт количества образующегося оксида $m_{i_xo_y}$, кг, определяем по формуле:

$$m_{i_xo_y} = \frac{m_i}{v_i \cdot \mu_i} \cdot v_{i_xo_y} \cdot \mu_{i_xo_y}, \quad (1)$$

где m_i - масса окисляющегося элемента i , кг;

v_i , $v_{i_xo_y}$ - стехиометрические коэффициенты элемента i и оксида i_xo_y соответственно;

μ_i , $\mu_{i_xo_y}$ - молекулярные массы элемента i и оксида i_xo_y соответственно.

Расчет количества кислорода, кг, необходимого для окисления элементов, определяем по формуле:

$$T_{O_2}(i) = m_{i_xo_y} - m_i \quad (2)$$

Углерод. Окисление углерода происходит по реакции $[C] + 1/2 \{O_2\} = \{CO\}$.

Образуется CO: $\frac{17,505 \cdot 28}{12} = 40,845$ кг.

Потребуется кислорода на окисление углерода: 23,34 кг.

Кремний. При окислении кремния по реакции $[\text{Si}] + 2[\text{O}] \rightarrow (\text{SiO}_2)$ образуется кремнезема: $\frac{127,5 \cdot 60}{28} = 273,214$ кг.

Потребуется кислорода на окисление кремния 145,714 кг.

Марганец. Окисление марганца происходит по реакции: $[\text{Mn}] + 1/2 \{ \text{O}_2 \} = (\text{MnO})$.
Образуется оксида марганца: $\frac{33,635 \cdot 71}{55} = 43,420$ кг, из них 20% теряется с газами, а 80% переходит в шлак.

С газами теряется $\frac{43,42 \cdot 20}{100} = 8,684$ кг (MnO); из них $\frac{33,635 \cdot 20}{100} = 6,727$ кг (Mn). В шлак переходит 34,736 кг (MnO); из них 26,908 кг (Mn).

Потребуется кислорода для окисления всего марганца 9,785 кг.

Сера. Допустим, что в период плавления она из шихты не удаляется.

Хром. Окисление хрома происходит по реакции: $2[\text{Cr}] + 2/3 \{ \text{O}_2 \} = (\text{Cr}_2\text{O}_3)$.
Образуется оксида хрома Cr_2O_3 $\frac{100,875 \cdot 152}{104} = 147,433$ кг.

Уносится печными газами $\frac{147,433 \cdot 20}{100} = 29,487$ кг (Cr_2O_3), из них $\frac{100,875 \cdot 20}{100} = 20,175$ кг (Cr). Переходит в шлак 117,946 кг (Cr_2O_3), из них – 80,7 кг (Cr).

Потребуется кислорода для окисления всего хрома 46,558 кг.

Никель. Считаем, что в период плавления в зоне электрических дуг испаряется 2% никеля, имевшегося в шихте. Испарившийся никель уносится печными газами в количестве 0,777 кг.

Титан. Оксид титана полностью переходит в шлак. Образуется TiO_2 : $\frac{2,145 \cdot 80}{48} = 3,575$ кг. Потребуется кислорода для окисления титана 1,43 кг.

Алюминий. При окислении алюминия образуется глинозема $\frac{3,235 \cdot 102}{54} = 6,111$ кг. Потребуется кислорода для окисления алюминия 2,876 кг.

Молибден, медь, ванадий. Принимаем, что в период плавления эти элементы из шихты не удаляются по причине небольшого их присутствия в шихте.

Железо. Считаем, что в период плавления 80% окислившегося железа теряется с газами, а 20% переходит в шлак. Образуется, оксидов железа в пересчете на FeO $\frac{225,502 \cdot 72}{56} = 289,931$ кг, по реакции $[\text{Fe}] + 1/2 \{ \text{O}_2 \} = (\text{FeO})$. Уносится печными газами $\frac{289,931 \cdot 80}{100} = 231,945$ кг (FeO), из них $\frac{225,502 \cdot 80}{100} = 180,402$ кг (Fe). Переходит в шлак 57,986 кг (FeO), из них 45,10 кг (Fe).

Потребуется кислорода для окисления всего железа 64,429 кг.

Металл. В конце периода плавления в печи остается следующее количество металла (с учетом угаров элементов): 11983,077 кг, содержание углерода в металле составит 0,584 %.

					220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

Содержание кислорода в металле определяем по формуле:

$$[O] = -\left(\frac{0,00216}{[C]}\right) + 0,00884 \quad (3)$$

$$\text{Содержание кислорода в металле } [O] = -\left(\frac{0,00216}{0,584}\right) + 0,00884 = 0,0051\%.$$

Определяем содержание кислорода в металле, которое пошло на насыщение металла, используя пропорцию:

$$\frac{11983,077 + x}{x} = \frac{100}{0,0051},$$

где x – искомая величина, кг;

$11983,077+x$ – масса металла с учетом содержания кислорода, кг;

$0,0051$ – содержание кислорода в металле, %.

$x=1,636$ кг

Шлакообразование.

Шлак периода плавления образуется из извести, шамотного боя, составляющих разрушающейся футеровки ванны, стен и свода, оксидов, полученных при окислении компонентов металлической шихты.

Расчет количества компонентов, вносимых в шлак, определяем по формуле:

$$m_i(j) = \frac{m_j \cdot (i)}{100}, \quad (4)$$

где $m_i(j)$ - масса компонента i , вносимого шлакообразующим j , кг;

m_j - расход шлакообразующего j , кг;

(i) – содержание компонента i в шлакообразующем j .

а) Расчет компонентов, вносимых известью в шлак, кг:

$$CaO - \frac{625 \cdot 92}{100} = 575$$

$$MgO - \frac{625 \cdot 1}{100} = 6,25$$

$$SiO_2 - \frac{625 \cdot 2}{100} = 12,5$$

Кроме того, выделится в атмосферу за счет потерь от прокаливания:

$$\frac{625 \cdot 5}{100} = 31,25 \text{ кг } (CO_2).$$

									Лист
									19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР				

б) Расчет составляющих, поступивших в шлак из футеровки ванны ДСП
 Примерный расход магнезитового порошка на заправку печи (при механизированной заправке) определяем по формуле, кг/т:

$$40 \cdot m_0^{-0,17}, \quad (5)$$

где m_0 – масса садки печи, кг.

Расход магнезитового порошка равен: $40 \cdot 12500^{-0,17} \cdot 12,50 = 100,0$ кг.

Тогда магнезит внесет в шлак, кг:

$$CaO - \frac{100 \cdot 8}{100} = 8$$

$$SiO_2 - \frac{100 \cdot 4,5}{100} = 4,5$$

$$MgO - \frac{100 \cdot 85}{100} = 85$$

В данном расчете ведем пересчет на FeO по формуле:

$$m_{FeO} = \frac{m_{Fe_2O_3} \cdot \mu_{Fe}(Fe_2O_3) \cdot \mu_{FeO}}{\mu_{Fe_2O_3} \cdot \mu_{Fe}(FeO)}, \quad (6)$$

где m_{FeO} и $m_{Fe_2O_3}$ - массы FeO и Fe₂O₃ соответственно, кг;

$\mu_{Fe}(Fe_2O_3)$ и $\mu_{Fe}(FeO)$ - молекулярная масса железа в Fe₂O₃ и FeO соответственно;

μ_{FeO} и $\mu_{Fe_2O_3}$ - молекулярные массы FeO и Fe₂O₃ соответственно

$$Fe_2O_3 - \frac{100 \cdot 2,5}{100} = 2,5, \text{ в пересчете на FeO}$$

$$FeO - \frac{2,5 \cdot 112 \cdot 72}{160 \cdot 56} = 2,25$$

в) Расчет составляющих, поступивших в шлак из стенок и свода

В сверхмощной печи применяются водоохлаждаемые стены и свод. В связи с этим расход магнезитохромитовой футеровки нижней части стен, центральной части и покрытия водоохлаждаемых панелей невелик. Примем суммарный расход магнезитохромитовых огнеупоров 1,5 кг/т стали, или 18,75 кг на всю садку. Тогда, разрушающаяся магнезитохромитовая футеровка внесет в шлак, кг:

$$CaO - \frac{18,75 \cdot 22}{100} = 4,125$$

$$SiO_2 - \frac{18,75 \cdot 12}{100} = 2,25$$

$$MgO - \frac{18,75 \cdot 60}{100} = 11,25$$

$$Cr_2O_3 - \frac{18,75 \cdot 2}{100} = 0,375$$

$$Fe_2O_3 - \frac{18,75 \cdot 4}{100} = 0,75, \text{ в пересчете на FeO}$$

$$FeO - \frac{0,75 \cdot 112 \cdot 72}{160 \cdot 56} = 0,675$$

г) Поступление в шлак золы электродов

Расход современных электродов составляет 4...5 кг/т отечественных фирм-производителей. Принимаем, что за время плавки расходуется 4 кг/т электродов, что составит 50 кг.

В электроде содержание углерода составляет 99 %, тогда окисляется углерода: $m_C = \frac{50 \cdot 99}{100} = 49,5$ кг. Принимаем, что 70 % углерода окисляется до {CO}, а 30 % - до {CO₂}. Тогда образуется:

$$m_{\{CO\}} = \frac{0,7 \cdot m_C}{\mu_C} \cdot \mu_{CO} = \frac{0,7 \cdot 49,5}{12} \cdot 28 = 80,85 \text{ кг};$$

$$m_{\{CO_2\}} = \frac{0,3 \cdot m_C}{\mu_C} \cdot \mu_{CO_2} = \frac{0,3 \cdot 49,5}{12} \cdot 44 = 54,45 \text{ кг}.$$

Количество кислорода, необходимого для окисления углерода составит:

$$m_{O_2} = m_{CO} - m_C = 80,85 - 49,5 \cdot 0,7 = 46,2 \text{ кг};$$

$$m_{O_2} = m_{CO_2} - m_C = 54,45 - 49,5 \cdot 0,3 = 39,6 \text{ кг}.$$

Итого масса кислорода на окисление углерода равна 85,8 кг.

Разрушающиеся электроды вносят в шлак, кг:

$$CaO - \frac{49,5 \cdot 0,118}{100} = 0,058$$

$$SiO_2 - \frac{49,5 \cdot 0,565}{100} = 0,28$$

$$Al_2O_3 - \frac{49,5 \cdot 0,317}{100} = 0,157$$

д) Зола кокса внесет, кг (11,5 % от всей массы кокса или 5,75 кг):

					220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

$$CaO - \frac{5,75 \cdot 5}{100} = 0,288; SiO_2 - \frac{5,75 \cdot 48,7}{100} = 2,80; MgO - \frac{5,75 \cdot 1}{100} = 0,058;$$

$$Al_2O_3 - \frac{5,75 \cdot 25}{100} = 1,438; P_2O_5 - \frac{5,75 \cdot 0,3}{100} = 0,017; Fe_2O_3 - \frac{5,75 \cdot 20}{100} = 1,15, \text{ в пересчете на}$$

$$FeO; FeO - \frac{1,15 \cdot 112 \cdot 72}{160 \cdot 56} = 1,035$$

е) Поступление оксидов в шлак из металлов, кг:

SiO₂ – 273,214
MnO – 34,736
Cr₂O₃ – 117,946
TiO₂ – 0,77
Al₂O₃ – 6,111
FeO – 57,986

Таблица 9 – Количество и состав печного шлака в конце периода плавления
В килограммах

Источник поступления	SiO ₂	CaO	MnO	ΣFeO	Cr ₂ O ₃
Известь	12,500	575,000	0,000	0,000	0,000
Футеровка ванны	4,500	8,000	0,000	2,250	0,000
Футеровка стен и свода	2,250	4,125	0,000	0,675	0,375
Оксиды из металлованны	273,214	0,000	34,736	57,986	117,946
Зола кокса	2,800	0,288	0,000	1,035	0,000
Электрод	0,280	0,058	0,000	0,000	0,000
Всего	295,544	587,471	34,736	61,946	118,321
Всего, %	24,387	48,476	2,866	5,112	9,763

Продолжение таблицы 9

Источник поступления	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	S	Σ
Известь	0,000	6,250	0,000	0,000	0,000	593,750
Футеровка ванны	0,000	85,000	0,000	0,000	0,000	99,750
Футеровка стен и свода	0,000	11,250	0,000	0,000	0,000	18,675
Оксиды из металлованны	6,111	0,000	3,575	0,000	0,000	493,568
Зола кокса	1,438	0,058	0,000	0,017	0,000	5,636
Электрод	0,157	0,000	0,000	0,000	0,000	0,495
Всего	7,706	102,558	3,575	0,017	0,000	1211,874
Всего, %	0,636	8,463	0,295	0,001	0,000	100,000

Расчет технического кислорода, необходимого для периода плавления.

Для определения расхода технического кислорода (в период плавления), составляем баланс кислорода для периода плавления, кг.

- 1) на окисление углерода – 23,34
 - 2) на окисление кремния – 145,714
 - 3) на окисление марганца – 9,785
 - 4) на окисление хрома – 46,558
 - 5) на окисление титана – 1,43
 - 6) на окисление алюминия – 2,876
 - 7) на окисление железа – 64,429
 - 8) на окисление электродов – 85,8
 - 9) на насыщение металла – 1,636
- Всего: 381,568.

В период плавления часть кислорода усваивается жидким металлом из печной атмосферы, а остальная часть подается с помощью кислородного инжектора. Скорость усвоения кислорода из воздуха на каждый квадратный метр площади печи на уровне откосов составляет величину порядка 10...30 кг/час. Если принять приближенно, что продолжительность плавления в 10 тонной печи составит 40 мин, то за это время усвоится кислорода $\frac{20 \cdot 3,14 \cdot 2,79^2 \cdot 0,667}{4} = 81,514$ кг. Следовательно, необходимо подать технического кислорода $381,568 - 81,514 = 300,054$ кг.

Определение количества и состава газов в период плавления.

Общая масса кислорода, усвоенного из воздуха, $m_{O_2} = 81,514$ кг. Объем кислорода в воздухе:

$$V_{O_2} = \frac{22,4}{\mu_{O_2}} \cdot m_{O_2} = \frac{22,4}{32} \cdot 81,514 = 57,06 \text{ м}^3.$$

Количество сопутствующего азота находим из условия, что объемное содержание кислорода в воздухе равно 21%, тогда, $V_N = \frac{100 - 21}{21} \cdot V_{O_2} = 214,654 \text{ м}^3$.

Массовое содержание кислорода в воздухе 23%, тогда, $m_N = \frac{100 - 23}{23} \cdot m_{O_2} = 191,03$ кг.

Объем и масса воздуха:

$$V_B = V_{O_2} + V_N = 57,06 + 214,654 = 271,714 \text{ м}^3;$$

$$m_B = m_{O_2} + m_N = 81,514 + 191,03 = 272,544 \text{ кг}.$$

Определим количество влаги, вносимой воздухом из следующих условий:

$$t_B = 20^\circ\text{C}, p_B = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}, f = 0,7, E = 2,026 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

Влажность атмосферного воздуха

										Лист
										23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР					

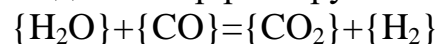
$$V_{\text{влаж.в}} = V_{\text{в}} \cdot \frac{273 + t_{\text{в}}}{273} \cdot \frac{p_{\text{в}}}{p_{\text{в}} - E \cdot f} \quad (7)$$

$$V_{\text{влаж.в}} = 271,714 \cdot \frac{273 + 20}{273} \cdot \frac{1,01 \cdot 10^5}{1,01 \cdot 10^5 - 2,026 \cdot 10^3 \cdot 0,7} = 295,774 \text{ м}^3$$

Количество водяного пара в 1 м³ атмосферного воздуха $\rho_{\text{в.пара}} = 0,013 \text{ кг/м}^3$.

Масса влаги $m_{\text{вл}} = V_{\text{влаж.в}} \cdot \rho_{\text{в.пара}} = 295,774 \cdot 0,013 = 3,845 \text{ кг}$.

Водяной пар реагирует с окисью углерода по реакции:



При этом образуется водород и углекислый газ в количестве:

$$m_{\{\text{H}_2\}} = \frac{m_{\text{вл}}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot \mu_{\text{H}_2} = \frac{3,845}{18} \cdot 2 = 0,427 \text{ кг};$$

$$m_{\{\text{CO}_2\}} = \frac{m_{\text{вл}}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot \mu_{\text{CO}_2} = \frac{3,845}{18} \cdot 44 = 9,40 \text{ кг}.$$

Для этого необходима окись углерода в количестве:

$$m_{\{\text{CO}\}} = \frac{m_{\text{вл}}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot \mu_{\text{CO}} = \frac{3,845}{18} \cdot 28 = 5,981 \text{ кг}.$$

Технический кислород.

Общая масса кислорода, вносимого кислородным инжектором составит 300,054 кг. Для того, чтобы внести такое количество кислорода, необходимо израсходовать в окислительный период технического кислорода при 95% усвоении:

$$\frac{300,054 \cdot 100 \cdot 100}{99,5 \cdot 95} = 317,434 \text{ кг},$$

где 300,054 – необходимо внести кислорода с техническим кислородом, кг;
99,5 и 95 – содержание кислорода в техническом кислороде и его усвоение, %.

Количество неусвоенного кислорода:

$$\frac{317,434 \cdot 5}{100} = 15,872 \text{ кг}.$$

Технический кислород также вносит азот:

$$\frac{317,434 \cdot 0,5}{100} = 1,587 \text{ кг},$$

										Лист
										24
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР					

где 5 – количество неусвоенного кислорода, %;
 0,5 – содержание азота в техническом кислороде, %.

Неусвоенный кислород вступит в реакцию с окисью углерода, в результате образуется углекислый газ в количестве:

$$m_{\{CO_2\}} = \frac{m_{O_2}}{\frac{1}{2} \mu_{O_2}} \cdot \mu_{CO_2} = \frac{15,872}{\frac{1}{2} \cdot 32} \cdot 44 = 43,648 \text{ кг.}$$

Для этого потребуется {CO} в количестве:

$$43,648 - 15,872 = 27,776 \text{ кг.}$$

Таблица 10 – Состав металла по расплавлению шихты

В килограммах

Элемент	Поступило с шихтой	Поступило в металл	Перешло в шлак	Потери с газами	Содержится в металле	Содержится в металле, %
C	87,525	0,000	0,000	17,505	70,020	0,584
O	0,000	1,636	0,000	0,000	1,636	0,014
Si	127,500	0,000	127,500	0,000	0,000	0,000
Mn	48,050	0,000	26,908	6,727	14,415	0,120
P	2,291	0,000	0,000	0,000	2,291	0,019
S	2,143	0,000	0,000	0,000	2,143	0,018
Cr	672,500	0,000	80,700	20,175	571,625	4,770
Ni	38,825	0,000	0,000	0,777	38,049	0,317
Ti	2,145	0,000	2,145	0,000	0,000	0,000
Al	3,235	0,000	3,235	0,000	0,000	0,000
W	9,160	0,000	0,000	0,000	9,160	0,076
Mo	155,100	0,000	0,000	0,000	155,100	1,294
V	47,550	0,000	0,000	0,000	47,550	0,397
Cu	23,150	0,000	0,000	0,000	23,150	0,193
Fe	11275,077	0,000	45,100	180,401	11049,575	92,197
ИТОГО	12500,000	1,636	285,588	225,585	11984,713	100,000

Суммарный материальный баланс периода плавления

Израсходовано, кг	Получено, кг
а) Шихты – 12500	а) Металла – 11984,713
б) Шлакообразующих – 625	б) Шлака – 1211,874
из них	в) Пыли – 270,886
1) известь – 625	в том числе
в) Футеровка ДСП – 118,75	1) MnO – 8,684
из них	2) Cr ₂ O ₃ – 29,487
1) магнезита – 100	3) Ni – 0,77
2) магнезитохромита – 18,75	4) FeO – 231,945
г) Электродов – 50	г) Газов – 419,73
д) технического кислорода – 317,513	в том числе
1) кислорода – 300,054	1) CO – 87,938 (от окисления металла и электродов с учетом догорания до CO ₂)
2) азота – 1,587	2) CO ₂ – 138,748 от прокаливания извести и окисления электродов с учетом догорания до CO)
3) н. кислород – 15,872	3) Азота – 192,617
е) воздуха – 276,816	4) Водорода – 0,427
в том числе	
1) кислорода – 81,514	
2) азота – 191,03	
3) водорода – 0,427	
4) влага – 3,845	
Всего – 13888,079	Всего – 13887,203

Невязка – $13888,079 - 13887,203 = 0,876$ кг или $\frac{0,876}{13888,079} \cdot 100 = 0,006\%$

Полученная невязка находится в допустимых пределах.

2.3 Расчет материального баланса окислительного периода

Общий угар металла и отдельных легирующих элементов в период продувки кислородом определяем по данным балансовых плавок и на основе производственного опыта. Составляем таблицу угаров для стали марки 4X5МФС (таблица 11).

Таблица 11 – Угар элементов при выплавке стали в ДСП в окислительный период
В процентах

Угар	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	W	Al	Mo	Cu	V	Fe
Общий	ΔC	100	68	0	0	16	0	100	0	100	0	0	0	1,5
В шлак	0	100	80	0	0	95	0	100	0	100	0	0	0	30
В улет	100	0	20	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	70

Окисление элементов и ожидаемый химический состав металла в конце окислительного периода представлен в таблице 12.

Для гарантированного получения заданного состава стали необходимо получить в конце обезуглероживания содержание углерода в металле 0,34 %.

Таблица 12 – Химический состав металла в конце окислительного периода
В килограммах

Элемент	Исходное содержание	Угар элемента	Масса элемента в расплаве	Содержание элемента в расплаве, %
C*	70,020	29,372	40,648	0,348
O	1,636	0,000	1,636	0,014
Si	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn	14,415	9,802	4,613	0,039
P	2,291	0,000	2,291	0,020
S	2,143	0,000	2,143	0,018
Cr	571,625	91,460	480,165	4,108
Ni	38,049	0,000	38,049	0,326
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000
Al	0,000	0,000	0,000	0,000
W	9,160	0,000	9,160	0,078
Mo	155,100	0,000	155,100	1,327
V	47,550	0,000	47,550	0,407
Cu	23,150	0,000	23,150	0,198
Fe	11049,575	165,744	10883,831	93,117
Всего	11984,713	296,378	11688,335	100,000

Определяем массу окислившегося углерода $\frac{11984,713 - m_{\Delta C}}{70,02 - m_{\Delta C}} = \frac{100}{0,34}$,

$$m_{\Delta C} = 29,372 \text{ кг.}$$

Углерод. При окислении углерода образуется оксида углерода CO

$$\frac{29,372 \times 28}{12} = 68,535 \text{ кг.}$$

Потребуется кислорода 39,163 кг.

Кремний, титан, алюминий. Окислились полностью.

Марганец. В окислительный период теряется 68% Mn; из этого количества 20% теряется с газами, а 80% переходит в шлак.

$$\text{Образуется MnO } \frac{9,802 \times 71}{55} = 12,654 \text{ кг.}$$

$$\text{Испарится MnO } \frac{12,654 \times 20}{100} = 2,531 \text{ кг, из них } \frac{9,802 \times 20}{100} = 1,96 \text{ кг Mn.}$$

Перейдет MnO в шлак 10,123 кг, из них 7,842 кг Mn. Потребуется кислорода для окисления всего марганца 2,852 кг.

Фосфор, сера, никель, вольфрам во время продувки из металла не удаляются.

$$\text{Хром. Образуется оксида хрома Cr}_2\text{O}_3 \frac{91,46 \times 152}{104} = 133,672 \text{ кг.}$$

$$\text{Испарится Cr}_2\text{O}_3 \frac{133,672 \times 5}{100} = 6,684 \text{ кг, из них } \frac{91,46 \times 5}{100} = 4,573 \text{ кг Cr.}$$

Перейдет в шлак Cr₂O₃ 126,988 кг, из них 86,887 кг Cr.

Потребуется кислорода для окисления всего хрома 42,212 кг.

Молибден, медь, ванадий в окислительный период из металла не удаляются.

Железо. Образуется оксидов железа в пересчете на FeO

$$\frac{165,744 \times 72}{56} = 213,1 \text{ кг. Испарится FeO } \frac{213,1 \times 70}{100} = 149,17 \text{ кг, из них}$$

$$\frac{165,744 \times 70}{100} = 116,021 \text{ кг Fe. Перейдет в шлак FeO } 63,93 \text{ кг, из них } 49,723 \text{ кг Fe. По-}$$

требуется кислорода для окисления железа 47,356 кг.

Металл. В конце окислительного периода в печи остается следующее количество металла (с учетом угаров элементов) – 11688,335 кг (см. табл. 12), содержание углерода в металле составит 0,348 % (см. табл. 12).

Определяем содержание кислорода в металле

$$[\text{O}] = \frac{0,0035 + 0,006 \times 0,348}{0,348} = 0,016\% .$$

Определяем содержание кислорода в металле, которое пошло на насыщение металла, используя пропорцию $\frac{11688,335 + x}{x} = \frac{100}{0,016}$,

$$x = 1,87 \text{ кг.}$$

В конце периода плавания в металле было 1,636 кг кислорода (см. табл. 12), следовательно, на насыщение металла пошло 1,87 – 1,636 = 0,234 кг.

										Лист
										28
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР					

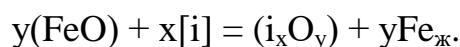
Для определения расхода технического кислорода в окислительный период составляем баланс кислорода, кг:

- 1) на окисление углерода – 39,163; 2) на окисление марганца – 2,852;
 - 3) на окисление хрома – 42,212; 4) на окисление железа – 47,356;
 - 5) на насыщение металла – 0,234;
- Всего – 131,817.

Примерно 30 % элементов окисляются кислородом (FeO), а остальные 70 % – газообразным кислородом, вдуваемым в жидкий металл. (FeO) идет на окисление углерода, марганца, хрома и на насыщение металла.

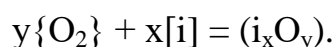
(FeO) внесет $(39,163 + 2,852 + 42,212 + 0,234) \times \frac{30}{100} = 25,338$ кг кислорода, а газообразный кислород внесет $131,817 - 25,338 = 106,479$ кг кислорода.

(FeO) окисляется по реакции



На это расходуется FeO $\frac{25,338 \times 72}{16} = 114,021$ кг, в металл переходит железо в количестве $114,021 - 25,338 = 88,683$ кг.

Газообразный кислород окисляет по реакции



В окислительный период часть газообразного кислорода усваивается жидким металлом из печной атмосферы. А остальная часть поступает с помощью кислородного инжектора. Скорость усвоения кислорода из воздуха на каждый квадратный метр площади печи на уровне откосов составляет величину порядка 10...30 кг/час. Если принять, что продолжительность периода составит 20 минут, то за это время усвоится кислорода $\frac{20 \cdot 3,14 \cdot 2,79^2 \cdot 0,333}{4} = 40,7$ кг.

Следовательно, необходимо внести технического кислорода $106,479 - 40,7 = 65,779$ кг.

Печная атмосфера.

Общая масса кислорода, усвоенного из воздуха, $m_{\text{O}_2} = 40,7$ кг. Объем кислорода в воздухе:

$$V_{\text{O}_2} = \frac{22,4}{\mu_{\text{O}_2}} \cdot m_{\text{O}_2} = \frac{22,4}{32} \cdot 40,7 = 28,49 \text{ м}^3.$$

									Лист
									29
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР				

Количество сопутствующего азота находим из условия, что объемное содержание кислорода в воздухе равно 21%, тогда, $V_N = \frac{100-21}{21} \cdot V_{O_2} = 107,18 \text{ м}^3$. Массовое содержание кислорода в воздухе 23%, тогда, $m_N = \frac{100-23}{23} \cdot m_{O_2} = 136,26 \text{ кг}$.

Объем и масса воздуха:

$$V_B = V_{O_2} + V_N = 28,49 + 107,18 = 135,67 \text{ м}^3;$$

$$m_B = m_{O_2} + m_N = 40,7 + 136,26 = 176,96 \text{ кг}.$$

Определим количество влаги, вносимой воздухом из следующих условий:

$$t_B = 20^\circ\text{C}, p_B = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}, f = 0,7E = 2,026 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

Влажность атмосферного воздуха

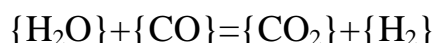
$$V_{\text{влаж.в}} = V_B \cdot \frac{273 + t_B}{273} \cdot \frac{p_B}{p_B - E \cdot f} \quad (8)$$

$$V_{\text{влаж.в}} = 135,67 \cdot \frac{273 + 20}{273} \cdot \frac{1,01 \cdot 10^5}{1,01 \cdot 10^5 - 2,026 \cdot 10^3 \cdot 0,7} = 147,68 \text{ м}^3$$

Количество водяного пара в 1 м^3 атмосферного воздуха $\rho_{\text{в.пара}} = 0,013 \text{ кг/м}^3$.

Масса влаги $m_{\text{вл}} = V_{\text{влаж.в}} \cdot \rho_{\text{в.пара}} = 147,68 \cdot 0,013 = 1,92 \text{ кг}$.

Водяной пар реагирует с окисью углерода по реакции:



При этом образуется водород и углекислый газ в количестве:

$$m_{\{H_2\}} = \frac{m_{\text{вл}}}{\mu_{H_2O}} \cdot \mu_{H_2} = \frac{1,92}{18} \cdot 2 = 0,21 \text{ кг};$$

$$m_{\{CO_2\}} = \frac{m_{\text{вл}}}{\mu_{H_2O}} \cdot \mu_{CO_2} = \frac{1,92}{18} \cdot 44 = 4,69 \text{ кг}.$$

Для этого необходима окись углерода в количестве:

$$m_{\{CO\}} = \frac{m_{\text{вл}}}{\mu_{H_2O}} \cdot \mu_{CO} = \frac{1,92}{18} \cdot 28 = 2,99 \text{ кг}.$$

Технический кислород.

					220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

Общая масса кислорода, вносимого кислородным инжектором составит 65,779 кг. Для того, чтобы внести такое количество кислорода, необходимо израсходовать в окислительный период технического кислорода при 95 % усвоении:

$$\frac{65,779 \cdot 100 \cdot 100}{99,5 \cdot 95} = 65,589 \text{ кг,}$$

Количество неусвоенного кислорода:

$$\frac{65,589 \cdot 5}{100} = 3,28 \text{ кг.}$$

Технический кислород также вносит азот:

$$\frac{65,589 \cdot 0,5}{100} = 0,328 \text{ кг,}$$

Неусвоенный кислород вступит в реакцию с окисью углерода, в результате образуется углекислый газ в количестве:

$$m_{\{CO_2\}} = \frac{m_{O_2}}{\frac{1}{2} \mu_{O_2}} \cdot \mu_{CO_2} = \frac{3,28}{\frac{1}{2} \cdot 32} \cdot 44 = 9,02 \text{ кг.}$$

Для этого потребуется {CO} в количестве:

$$9,02 - 3,28 = 5,74 \text{ кг.}$$

На основании полученных данных определяем количество и состав печного шлака в конце окислительного периода (таблица 13).

Таблица 13 – Масса и состав шлака в конце окислительного периода

В килограммах

Источник поступления	Плавильный шлак	Оксиды из металлической ванны	Перешло в металл	Всего	Всего, %
SiO ₂	295,544	0,000	0,000	295,544	22,754
CaO	587,471	0,000	0,000	587,471	45,229
MnO	34,736	10,123	0,000	44,859	3,454
∑FeO	61,946	63,930	-114,021	11,855	0,913
Cr ₂ O ₃	118,321	126,988	0,000	245,309	18,886
Al ₂ O ₃	7,706	0,000	0,000	7,706	0,593
MgO	102,558	0,000	0,000	102,558	7,896

TiO ₂	3,575	0,000	0,000	3,575	0,275
P ₂ O ₅	0,017	0,000	0,000	0,017	0,001
Σ	1211,874	201,041	-114,021	1298,894	100,000

Составляем баланс металла окислительного периода (таблица 14).

Таблица 14 – Баланс металла окислительного периода

В килограммах

Элемент	Металл периода плавнения	Перешло в металл	Перешло в шлак	Потери с газами	Содержится в металле	Содержится в металле, %
C*	70,020	0,000	0,000	29,372	40,648	0,345
O	1,636	0,234	0,000	0,000	1,870	0,016
Si	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn	14,415	0,000	7,842	1,960	4,613	0,039
P	2,291	0,000	0,000	0,000	2,291	0,019
S	2,143	0,000	0,000	0,000	2,143	0,018
Cr	571,625	0,000	86,887	4,573	480,165	4,077
Ni	38,049	0,000	0,000	0,000	38,049	0,323
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Al	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
W	9,160	0,000	0,000	0,000	9,160	0,078
Mo	155,100	0,000	0,000	0,000	155,100	1,317
V	47,550	0,000	0,000	0,000	47,550	0,404
Cu	23,150	0,000	0,000	0,000	23,150	0,197
Fe	11049,575	88,683	22,062	51,478	10972,514	93,167
Всего	11984,713	88,917	116,791	87,383	11777,252	100,000

Суммарный материальный баланс окислительного периода

Израсходовано, кг:

- 1) металла – 11984,713;
- 2) шлака – 1211,874;
- 3) тех. кислорода – 69,387;
- 4) воздуха – 179,09.

Всего: 13445,064

Получено, кг:

- 1) металла – 11777,252;
- 2) шлака – 1298,894;
- 3) пыли – 158,384;
- 4) газов – 210,253.

Всего: 13444,783

Лист

220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР

32

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

Невязка: $13445,064 - 13444,783 = 0,281$ кг или $\frac{0,281}{13445,064} \times 100 = 0,002 \%$.

Полученная невязка находится в допустимых пределах.

2.4 Расчет материального баланса в агрегате печь-ковш

После окислительного периода из печи металл выпускают в ковш. В печи остается 90% шлака и 5% металла, в ковше наводят новый рафинировочный шлак из извести и плавикового шлака, в соотношении 3:1 или 4:1.

а) Расчет компонентов, вносимых известью в шлак, кг:

Для проведения десульфурации необходима основность шлака $B=3,5 \dots 4,0$.
Принимая $B=4,0$, получим

$$B = \frac{m_{(\text{CaO})\text{п.шл}} + m_{(\text{CaO})\text{изв}}}{m_{(\text{SiO}_2)\text{п.шл}} + m_{(\text{SiO}_2)\text{изв}}} = 4,0$$

Отсюда следует, что

$$m_{\text{изв}} = \frac{4 \cdot m_{(\text{SiO}_2)\text{п.шл}} - m_{(\text{CaO})\text{п.шл}}}{\frac{\text{CaO}_{\text{изв}}}{100} - 4 \cdot \frac{\text{SiO}_{2\text{изв}}}{100}}$$

$$m_{\text{изв}} = \frac{4 \cdot 29,554 - 58,747}{\frac{88}{100} - 4 \cdot \frac{1,2}{100}} = 71,5 \text{ кг}$$

$$\text{CaO} - \frac{71,5 \times 80}{100} = 57,2; \text{SiO}_2 - \frac{71,5 \times 2}{100} = 1,43; \text{MgO} - \frac{71,5 \times 12}{100} = 8,58.$$

Кроме того, выделится в атмосферу за счет потерь при прокаливании:

$$\frac{71,5 \times 5}{100} = 3,575 \text{ кг CO}_2.$$

б) Расчет компонентов, вносимых плавиковым шпатом, кг:

$$\text{CaO} - \frac{17,8 \times 0,5}{100} = 0,089; \text{SiO}_2 - \frac{17,8 \times 3,6}{100} = 0,641; \text{Al}_2\text{O}_3 - \frac{17,8 \times 0,2}{100} = 0,036; \text{CaF}_2 - \frac{17,8 \times 94}{100} = 16,732; \text{Fe}_2\text{O}_3 - \frac{17,8 \times 1,5}{100} = 0,267 \text{ в пересчете на FeO (5) - 0,24}$$

Кроме того, выделится в атмосферу за счет потерь при прокаливании:

										Лист
										33
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР					

$$\frac{17,8 \times 0,2}{100} = 0,036 \text{ кг CO}_2.$$

в) Расчет компонентов, вносимых футеровкой печи – ковша

Выбираем футеровку печи – ковша, изготовленную из магнезитохромитового кирпича. Расход магнезитохромитовой футеровки на ремонт для печи – ковша емкостью 12,50 тонн – 30 кг/т. Срок службы футеровки печи – ковша принимаем 45 плавков. Расход футеровки на одну плавку составит $\frac{12,5 \times 30}{45} = 8,3 \text{ кг}$.

Тогда разрушающаяся магнезитохромитовая футеровка внесет в шлак, кг:

$$\text{CaO} - \frac{8,3 \times 16}{100} = 1,328; \quad \text{SiO}_2 - \frac{8,3 \times 12}{100} = 0,996; \quad \text{MgO} - \frac{8,3 \times 66}{100} = 5,478; \quad \text{Cr}_2\text{O}_3 - \frac{8,3 \times 2}{100} = 0,166; \quad \text{Fe}_2\text{O}_3 - \frac{8,3 \times 4,0}{100} = 0,332, \text{ в пересчете на FeO} - 0,3;$$

г) Раскисление шлака и металла. Предварительное легирование

Чтобы провести первоначальное раскисление, вводим в печь на средний уровень ферромарганец, ферросилиций, феррохром, ферромolibден, феррованадий. Химический состав легирующих и раскислителей, которые предполагаем, использовать в процессе выплавки указан в таблице 15.

Таблица 15 – Химический состав легирующих и раскислителей

В процентах

Материал	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	W	Mo	Ca	Cu	Al	Fe
ФС65	–	65,00	0,40	0,05	0,02	0,40	–	–	–	–	–	2,00	32,13
ФМн 88	2,00	3,00	88	0,1	0,02	–	–	–	–	–	–	–	6,88
ФМо60	0,05	0,80	–	0,05	0,10	–	–	–	60	–	–	–	39,00
ФХ 100	0,78	1,45	–	0,02	0,02	72,50	–	–	–	–	–	–	25,23
А 97	–	0,01	–	–	–	–	–	–	–	–	–	99,98	0,01

Кремний. Для раскисления стали кремнием необходимо внести ФС65:

$$\frac{12500 \times (1,05 - 0)}{65} = 202 \text{ кг или } \frac{202 \times 65}{100} = 131,3 \text{ кг кремния.}$$

При этом 30% алюминия переходит в шлак, а остальные их элементы в виду их малого количества перейдут в металл. Выгорает $\frac{202 \times 2 \times 30}{100 \times 100} = 1,212 \text{ кг алюминия.}$

Это количество алюминия свяжет кислорода $\frac{1,212 \times 48}{54} = 1,077 \text{ кг}$. При этом образуется и перейдет в шлак: $\frac{1,077 \times 102}{54} = 2,034 \text{ кг Al}_2\text{O}_3$

ФС65 внесет в металл, кг:

$$\text{Si} - \frac{202 \times 65}{100} = 131,3; \text{Mn} - \frac{202 \times 0,4}{100} = 0,808; \text{P} - \frac{202 \times 0,05}{100} = 0,101;$$

$$\text{S} - \frac{202 \times 0,02}{100} = 0,04; \text{Cr} - \frac{202 \times 0,4}{100} = 0,808; \text{Fe} - \frac{202 \times 32,13}{100} = 64,903; \text{Al} -$$

$$\frac{202 \times 2 \times 70}{100 \times 100} = 2,828$$

Хром. Определим расход низкоуглеродистого феррохрома ФХ100:

$$\frac{12500 \times (5,0 - 4,077)}{72,5} = 160 \text{ кг.}$$

ФХ100 вносит в металл, кг:

$$\text{C} - \frac{160 \times 0,78}{100} = 1,248; \text{Si} - \frac{160 \times 1,45}{100} = 2,32; \text{P} - \frac{160 \times 0,02}{100} = 0,032;$$

$$\text{S} - \frac{160 \times 0,02}{100} = 0,032; \text{Cr} - \frac{160 \times 72,5}{100} = 116; \text{Fe} - \frac{160 \times 25,23}{100} = 40,368;$$

Марганец. Определяем расход среднеуглеродистого ферромарганца ФМн88:

$$\frac{12500 \times (0,35 - 0,039)}{88} = 39 \text{ кг.}$$

ФМн88 вносит в металл, кг:

$$\text{C} - \frac{39 \times 2}{100} = 0,78; \text{Si} - \frac{39 \times 3}{100} = 1,17; \text{P} - \frac{39 \times 0,1}{100} = 0,039;$$

$$\text{S} - \frac{39 \times 0,02}{100} = 0,008; \text{Mn} - \frac{39 \times 88}{100} = 34,32; \text{Fe} - \frac{39 \times 6,88}{100} = 2,683.$$

Молибден. Определяем расход ферромolibдена ФМо60:

$$\frac{12500 \times (1,35 - 1,317)}{60} = 7 \text{ кг.}$$

ФМо60 вносит в металл, кг:

					220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

$$C - \frac{7 \times 0,05}{100} = 0,004; Si - \frac{7 \times 5}{100} = 0,35; P - \frac{7 \times 0,05}{100} = 0,004; S - \frac{7 \times 0,1}{100} = 0,007; Mo - \frac{7 \times 60}{100} = 4,2; Fe - \frac{7 \times 34,8}{100} = 2,435;$$

Таблица 16 – Количество и состав металла в ковше

В килограммах

Элемент	Металл окислительного периода	Легирующие и раскислители	Содержится в металле	Содержится в металле, %
C	38,616	2,032	40,648	0,351
O	1,777	-1,077	0,700	0,006
Si	0,000	135,140	135,140	1,166
Mn	4,382	35,128	39,510	0,341
P	2,176	0,176	2,352	0,020
S	2,035	0,087	2,122	0,018
Cr	456,157	116,808	572,965	4,942
Ni	36,146	0,000	36,146	0,312
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000
Al	0,000	2,828	2,828	0,024
W	8,702	0,000	8,702	0,075
Mo	147,345	4,200	151,545	1,307
V	45,173	0,000	45,173	0,390
Cu	21,993	0,000	21,993	0,190
Fe	10423,889	110,389	10534,278	90,859
Всего	11188,390	405,711	11594,101	100,000

Таблица 17 – Количество и состав шлака в ковше

В килограммах

Источник поступления	Шлак окислительного периода	Легирующие и раскислители	Футеровка ковша	Известь	Плавиновый шпат	Всего	Всего, %
SiO ₂	29,554	0,000	0,996	1,430	0,641	34,621	15,355
CaO	58,747	0,000	1,328	57,200	0,089	109,364	48,506
MnO	4,486	0,000	0,000	0,000	0,000	4,486	1,990
∑FeO	1,186	0,000	0,300	0,000	0,240	1,726	0,765
Cr ₂ O ₃	24,531	0,000	0,166	0,000	0,000	24,697	10,954

Al ₂ O ₃	0,771	2,034	0,000	0,000	0,036	9,165	4,065
MgO	10,256	0,000	5,478	8,580	0,000	24,314	10,784
TiO ₂	0,358	0,000	0,000	0,000	0,000	0,358	0,159
P ₂ O ₅	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,001
CaF ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	16,732	16,732	7,421
S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Σ	129,889	2,034	8,268	67,210	17,738	225,464	100,000

Суммарный материальный баланс в ковше

Израсходовано, кг	Получено, кг
а) Металл – 11188,390	а) Металла – 11594,101
б) Шлак – 129,889	б) Шлака – 225,464
г) Известь – 71,5	в) Газов – 3,611
д) Плавиковый шпат -17,8	
е) Футеровка ковша – 8,3	
ж) легирующие – 408	
в т.ч.	
1) ФХ100 – 160	
2) ФС65 – 202	
3) ФМн88 – 39	
4) ФМн60 – 7,0	
Всего – 11823,879	Всего – 11823,176

Невязка – 11823,879 – 11823,176 = 0,703 кг или $\frac{0,703}{11823,879} \cdot 100 = 0,006\%$

Полученная невязка находится в допустимых пределах.

Суммарный материальный баланс плавки.

Израсходовано, кг	Получено, кг
а) Шихта – 12500	а) Металла – 12182,964 (с учетом металла оставшегося в печи)
б) Шлакообразующие – 714,3	б) Шлака – 1394,469 (с учетом шлака оставшегося в печи)
в) Легирующие и раскислители – 408	в) Пыли – 429,27
г) Электроды – 50	г) Газов – 633,594
д) Футеровка печи и ковша – 127,05	
е) Технический кислород – 386,9	
ж) Воздух – 455,906	
Всего: 14642,16	Всего: 14640,297

Невязка – $14642,16 - 14640,297 = 1,861$ кг или $\frac{1,861}{16642,16} \cdot 100 = 0,012 \%$

Полученная невязка находится в допустимых пределах.

					220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		38

3 Маркетинговое исследование

3.1 Особенности развития рынка инструментальных производств:

Рынок инструментальной оснастки является растущим и до конца не заполненным.

Крупных производителей на российском рынке инструментальных производств немного, наиболее крупные производства находятся на базе инструментальных производств уже давно существующих предприятий (Ижевский инструментальный завод, ЗАО «Атлант» из Беларуси и др.).

Нет отработанного механизма финансирования, отрасль «непрозрачная», что не способствует привлечению инвестиций. Отсюда следует характер рынка инструментальных производств – примыкание к различным финансово-промышленным группам. Так, некоторые игроки на рынке инструментальных производств работают в рамках холдинговых структур, предоставляя основную часть своей продукции на нужды предприятий, входящих в холдинг. Для обеспечения вхождения в холдинг одно из требований – повышение прозрачности менеджмента.

Продукция инструментального производства – технологическая оснастка, пресс-формы, штампы – является «штучной» и «уникальной», т.е. существует сильная зависимость от наличия и объемов заказов. Эти обстоятельства способствуют развитию инструментальных производств при основных промышленных заводах [7].

Выделение инструментальных производств на базе заводов в самостоятельные юридические образования с целью удовлетворения в первую очередь потребностей основных производств, а также с целью дополнительной возможности обеспечения заказов от внешних заказчиков. Например, это ДОО «Ижевский инструментальный завод» – на базе «Ижмаш», ОАО «КЭМЗ-Инструмент» – на базе Ковровского электромеханического завода, Бюро пресс-форм завода им. Дегтярева и Инструментальное производство ОАО «Зид» – на базе ОАО «Завод им. В.А.Дегтярева», а также Автономное подразделение по проектированию и производству пресс-форм и штампов на базе ООО ТЗК «Техоснастка» (Москва) [8].

Специализация игроков на рынке инструментальных производств на определенных услугах продукции.

Рост тарифов на электроэнергию и металлы, что уже сейчас заметно снижает рентабельность продукции машиностроения и будет еще более значимым при вступлении нашей страны в ВТО (за последние годы поставщики металла резко повысили свою цену на металл, а цена на машиностроительную продукцию практически не выросла).

Вступление России в ВТО усилит международную конкуренцию: снижение таможенных пошлин будет способствовать массированному увеличению импорта продукции инструментальных производств из стран Юго-Восточной Азии, а также ужесточению внутренней конкуренции и снижению цен на продукцию.

											Лист
											39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР						

Экономический рост в России, развитие высокотехнологичных производств способствуют росту спроса на высокотехнологичную и качественную продукцию инструментальных производств, поставляемую преимущественно из Европы.

Кадры: недостаток специалистов (отсутствие системы обучения молодых специалистов), непривлекательный уровень заработной платы на предприятиях отрасли и, особенно в регионах (при этом порой все еще существуют серьезные задержки в выплате зарплаты). Для решения данной проблемы некоторые конкуренты самостоятельно работают над обеспечением кадровыми резервами своих потребностей: проводят семинары и организуют обучающие программы на своих предприятиях, заинтересовывают школьников (экскурсии в цеха), работают совместно со специализированными учебными учреждениями (институтами и др.). С другой стороны, покупка и использование предприятиями современного и дорогостоящего оборудования диктует необходимость проведения обучения и для уже работающего персонала предприятий [14].

Изношенность производственных фондов российских предприятий. Усиление конкуренции и требований к повышению качества диктуют необходимость технического перевооружения предприятий, закупку самого современного оборудования, использование более «продвинутых» технологий, а также использование современных компьютерных систем проектирования оснастки CAD/CAM/CAE и др.

По мнению многих участников рынка, в настоящее время наблюдается рост рынка пресс-форм и штампов. Использование стандартных деталей при изготовлении штампов и пресс-форм позволяет значительно сокращать сроки производства, что уже используют некоторые российские производители пресс-форм.

Приведённые данные свидетельствуют о том, что рынок инструмента в России находится еще в стадии становления. В современных условиях руководителям и организаторам производства, профессионалам-инструментальщикам необходимо овладеть новыми знаниями в области маркетинга и менеджмента с целью ориентации всей хозяйственной деятельности предприятия на эффективное достижение поставленных рынком задач.

Отечественный рынок становится частью мирового рынка, ориентированного в первую очередь на потребности потребителя. Этот принцип уже взят на вооружение некоторыми российскими предприятиями и компаниями, торгующими инструментом и осуществляющими услуги по его эксплуатации и восстановлению.

3.2 Состояние рынка штампового инструмента в России

Сталь инструментальная штампованная широко используется для производства различных инструментов, которые эксплуатируются в сфере обработки. С помощью этих инструментов осуществляется обработка металлических заготовок под давлением. Таким образом, штампованная сталь применяется в изготовлении пуансонов, штампов, валиков, роликов и других обрабатывающих устройств. Именно от штамповочных устройств и произошло название стали данного типа.

Штампованные поковки весом от 12 до 25 кг относятся к легкому классу поковок. Одним из оптимальных станков для их производства является, к примеру, кривошипный горячештамповочный пресс модели КБ8046 усилием 4000 тс производства ОАО «Завод по производству тяжелых механических прессов» (Тяж-мехпресс) в Воронеже.

Типичными изделиями, изготавливаемыми из данных поковок при помощи последующей механообработки, являются всевозможные шестерни, коленчатые валы, поворотные кулаки, стойки, корпуса запорной арматуры и другие многообразные изделия.

Области применения подобных изделий – транспортное машиностроение (автотракторная и железнодорожная отрасли), производство станочного оборудования, запорная арматура и другие отрасли машиностроения.

В России в настоящее время действует значительное число заводов – изготовителей поковок различного веса. Предприятия, описанные ниже, позиционируют себя как кузнечно-механические, то есть изготавливающие заготовки для предприятий из других отраслей экономики. Среди них: ОАО «Уральская кузница», ОАО «Челябинский кузнечно-прессовый завод», ЗАО «Кузнечно-механический завод «Ижора-Металл», ЗАО НПФ «Робопамп», Ижевский инструментальный завод, «Найпро», «АБ-Универсал» и другие.

В связи с расширением рынка пресс-форм увеличивается количество игроков, часть из которых работает в интересах малого и среднего бизнеса и специализируется на производстве пресс-форм и штампов для изготовления продукции из полимерных материалов, а часть игроков занимается только проектированием и разработкой пресс-форм, предоставляя готовые разработки заказов более технологически оснащенным предприятиям.

Цена на технологическую оснастку сильно варьируется: отечественные производители предлагают изготовление требуемой продукции по невысоким ценам, в то время как импортные аналоги в силу ряда причин значительны по цене. Оснастка, предлагаемая европейскими производителями, максимальная по цене, в то время как производители из стран Юго-Восточной Азии вследствие дешевизны рабочей силы и ряда других факторов предлагают свою продукцию по очень невысоким ценам.

Странами-лидерами производства, экспорта и импорта кузнечно-прессового оборудования (КПО) являются страны с развитой индустрией и большим внутренним спросом от серийных и массовых производителей товаров.

Мировой рынок кузнечно-прессовых станков в 2020 году показал заметное восстановление объема продаж в 3 квартале 2020 года. Это изменение в +17,6 % по отношению ко 2 кварталу 2020 года. Если в 1 квартале 2019 года объем продаж на рынке кузнечно-прессовых станков был 2 200 472 тысяч долларов, то уже в 3 квартале 2020 года объем продаж снизился до 1 874 722 тысяч долларов. При этом получилось, что показатель продаж был рекордно низким за период 2019 – 3 квартал 2020 года – во 2 квартале 2020 года (рисунок 1)[14].

											Лист
											41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР						

Сравнение 9 месяцев 2020 и 2019 года наиболее показательно с точки зрения понимания изменений, произошедших в 2020 году на рынке кузнечно-прессовых станков, пока полные данные за 2020 год не появились. За 9 месяцев 2020 года по отношению к аналогичному периоду 2019 года мы оцениваем изменение объема продаж на рынке кузнечно-прессовых станков на -22,8 % до уровня 5 396 544 тысяч долларов. Конечно если сравнивать в натуральном выражении, то показатель продаж кузнечно-прессовых станков будет другой, как может быть и другая динамика. Однако более иллюстрирующая динамика наблюдается именно в денежном выражении, поскольку этот показатель оценивает количество денежных средств, оборачивающихся на данном рынке.

Рисунок 1 - Динамика продаж на мировом рынке кузнечно-прессовых станков в 2019 - 2020 гг.

Доли стран поставщиков на рынке кузнечно-прессовых станков меняются ежеквартально, не говоря уже о ежегодном изменении. Также меняется и рейтинг стран поставщиков. Среди стран поставщиков на мировом рынке кузнечно-прессовых станков в 3 квартале 2020 года на первые места среди других стран мира встали: Италия с долей 17,05 %, Германия с долей 13,82 %, Китай – 11,72 %. По результатам анализа, среди других заметных стран-поставщиков: Япония, США, Испания, Республика Корея, Австрия, Турция, Китайский Тайбэй и другие страны (рисунок 2). Среди поставщиков кузнечно-прессовых станков есть и Россия. До 3 квартала 2020 года, страна не была в числе первых мест в объемах мировых продаж. В 3 квартале 2020 года произошло заметное изменение объема продаж кузнечно-прессовых станков Россией на 10,4 %. Это оказало существенное влияние на изменение места страны по продажам кузнечно-прессовых станков среди других игроков мирового рынка.

Рисунок 2 - Доли стран мира в продажах на мировом рынке кузнечно-прессовых станков в 3 кв. 2020 г.

Изношенность производственных фондов на предприятиях России, по мнению экспертов, значительна. Вложения в основные средства производства (оборудование и инструмент) повышают производительность и конкурентоспособность

						220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			42

предприятий, но вынужденная стратегия заказчиков на снижение издержек затрагивает даже вопрос оснастки предприятий.

Изменения в развитии отдельных отраслей промышленности влияют на структуру заказов на пресс-формы и штампы. Так, например, некоторые производители отмечают появление заказов на крупногабаритные штампы – штампы для холодной листовой штамповки и пресс-формы для литья алюминиевых, пластмассовых или резиновых деталей (например, формы для производства металлорезиновых гусеничных траков), а также появление более дорогих заказов на высококачественную, трудоемкую технологическую оснастку, позволяющую производить товары, способные конкурировать с импортными аналогами и по цене и по качеству (например, заказы на штампы для изготовления частей электродвигателей, требования: повышенная износостойчивость, использование твердосплавных материалов).

Инструментальное производство способно изготавливать практически любую номенклатуру штампового инструмента. Рынок штампового инструмента, как товара промышленного назначения, отличается от рынка товаров широкого потребления следующими характеристиками: на нем меньше покупателей, эти немногочисленные покупатели крупнее; эти покупатели сконцентрированы географически. В основном это крупные промышленные центры: Москва, Санкт-Петербург, Нижний Новгород, Волгоград и др.

Техническое состояние штампового инструмента зависит от его износостойкости и прочности. Работоспособность и надёжность штампов определяется вероятностью его безотказной работы, гарантийной стойкостью и временем восстановления. Чем выше эти характеристики инструмента, тем больше спрос у потребителя на данную продукцию.

Что характерно, как раз в 2018–2019 годах российский рынок станков продемонстрировал снижение объемов продаж. Так, в соответствии с данными компании BusinesStat, если в 2017 году металлообрабатывающих станков в России было продано 20,5 тысяч штук, то в 2018 году аналогичный показатель составили лишь 19,8 тыс. ед. оборудования. Предварительные данные по итогам 2019 года также указывали на снижение. В первом квартале 2020 года на мировой рынок оказал очень сильное влияние фактор пандемии COVID-19. В полной мере это коснулось и России. Так, в начале апреля 2019 года издание «Коммерсантъ» писало о том, что консенсус-прогноз агентства FocusEconomics предполагает падение ВВП России на 1,4 % в 2020 году и его возвращение к росту на 2,3 % в 2021-м. Станки в целом являются инвестиционным товаром. И если в начале 2020 года отрасль работала по тем заказам и контрактам, которые были заключены ранее, то уже во второй половине текущего года и в 2021 году мы можем увидеть заметный спад производства, связанный с пересмотром своих планов компаниями, работающими в целевых для станкостроения отраслях промышленности. В первую очередь это касается предприятий ОПК. Однако в этом сегменте практически все, в конечном счете, зависит от тех управляющих решений, которые выработает государство, практически напрямую управляющее этой сферой производства. По мнению

BusinesStat прогноз о начале восстановительного роста в 2021 году российского рынка металлообрабатывающего оборудования произойдет с задержкой как минимум на год.

Станкоинструментальная промышленность России в своем составе имеет: основных производителей, выпускающих металлорежущие станки – 46,

- кузнечнопрессового оборудования – 25 предприятий,
- режущий, мерительный, слесарно-монтажный инструмент – 29 предприятий,
- научно-исследовательских институтов – 7
- конструкторских бюро на предприятиях – 45.

Общая численность работающих в отрасли, по данным Росстата, в 2009 г составила 96 тысяч человек, в том числе в производстве металлообрабатывающего оборудования и инструмента - 68 тысяч человек. На Станкоинструментальное производство приходится 0,1 % ВВП и 0,18 % промышленного производства, его доля в машиностроении составляет 2,3 %. Станкоинструментальная промышленность является одной из важнейших фондообразующих отраслей. Техническое состояние этой отрасли во многом определяет уровень развития всей экономики. Формируя парк технологического оборудования, составляющий главную долю активной части основных производственных фондов в машиностроении и металлообработке и, в первую очередь, в стратегически важных отраслях промышленности, станкоинструментальная промышленность определяет уровень производительных сил общества, является одной из главных составляющих научно-технического прогресса, влияет на уровень материальных и трудовых затрат в экономике страны [14].

3.3 Оценка в потребности и производстве стали марки 4X5МФС

Особенностью станкостроительного производства во всем мире является его низкая рентабельность, а, следовательно, и малая привлекательность для инвесторов. Поддержкой станкостроения в развитых странах занимается государство, именно оно заинтересовано в развитии высокотехнологичных отраслей, обеспечении технологической независимости, а на ее основе - обороноспособности. Помимо развитых стран - Японии, Германии, Италии, США, форсировано развивают производство Китай, Индия, Бразилия, вкладывая значительные средства в создание независимой технологической базы.

Объем производства продукции станкостроения за январь-август 2020 года по оценке составил 12,49 миллиардов рублей (увеличение на 25,7 % по сравнению с аналогичным периодом 2019 годом).

По предварительной оценке, экспорт продукции станкостроения (без учета в страны ЕАЭС) за январь-август 2020 года снизился на 4 % по сравнению с аналогичным периодом 2019 года и составил 1,95 миллиардов рублей, а доля экспорта в производстве за январь-август 2020 г. составила 15,6 %.

Объем российского рынка за январь-август 2020 г. по оценке увеличился на 7,6 % и составил 56,12 миллиардов рублей.

Объём производства станкоинструментальной продукции к 2035 году должен вырасти в 2,4 раза по сравнению с 2019 годом и достичь 79,5 миллиардов рублей. Такой показатель заложен в стратегии развития отрасли.

Объём экспорта, через 15 лет должен увеличиться в 2,6 раза и составит 16,5 миллиардов рублей. Также заданы показатели по локализации производства станков (70 %) и изготовлению комплектующих в объёме 11,1 миллиардов рублей.

Достичь этих целей планируется за счёт стимулирования спроса, формирования условий для притока инвестиций в научные исследования, интеграции российских производителей в мировые цепочки поставок, а также повышения производительности труда и улучшения кадрового обеспечения.

Реализация стратегии обеспечит рост производства со средним темпом 5,7 % в год, повысит конкурентоспособность отрасли и позволит российским компаниям укрепить свои позиции на мировых рынках.

Для обеспечения роста производства проката из инструментальных марок сталей с целью обеспечения спроса на внутреннем рынке и более широкого выхода на мировой рынок металлургическим предприятиям необходимо осуществить мероприятия по повышению качества производимого проката.

Целевые характеристики обрабатываемого инструмента (рисунок 3,4) были заданы исходя из характеристик наиболее распространенных технологий изготовления инструмента, а именно компактирования нанодисперсных порошков (в основном, твердых сплавов) и нанесения наноструктурных покрытий (в основном, многослойных). По результатам экспертного исследования выявлено, что Россия в настоящее время движется в русле мировых технологических тенденций, однако отстает в части достижения конкретных эксплуатационных характеристик. Выход на технологический уровень, соответствующий мировому, как в области твердых сплавов, так и в области покрытий, ожидается не ранее 2020-2025 гг.

Рисунок 3 – Твердость вольфрамосодержащих твердых сплавов, ГПа

Рисунок 4 – Микротвердость многослойных нанопокровтий, ГПа

Изделие	Виды нанесения покрытий
Штампы, пресс - формы, ролики и фильеры из инструментальной стали	– нанесение наноструктурных покрытий (85%) – наномодификация поверхностного слоя (15%)
Штампы, пресс - формы, ролики и фильеры из твердого сплава	– компактирование нанодисперсных порошков и производство инструмента из объемных наноструктурных материалов (45%) – нанесение наноструктурных покрытий

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР

Лист

45

тий (40%)
 – детонационные, плазмохимические и др. технологии синтеза сверхтвердых материалов с наносвязками (15%)

Особое внимание можно уделить производству стали марки 4Х5МФС, которая является штампованной инструментальной.

Это высококачественный сплав, который наиболее устойчивый к ударным нагрузкам и механическим воздействиям. Из данного материала происходит изготовление фасонного и сортового проката, серебрянки, полос, шлифованных и калиброванных прутков, кованных заготовок.

В качестве наиболее популярных аналогов, которые производятся в России, следует привести марки 4Х5МФ1С и 4Х4ВМФС. Современная промышленность активно применяет изделия, которые изготовлены из стали данной марки.

Стали для изготовления штампового инструмента делятся на две разновидности. Первая разновидность используется для получения инструментов, участвующих в холодной деформации металлических заготовок. Вторая разновидность идёт на создание устройств, позволяющих деформировать металлическую заготовку в разогретом состоянии.

К ним относятся:

- крупные прессовые вставки;
- молотовые вставки;
- мелкие молотовые штампы;
- пресс-формы для литья различных видов сплавов.

Сталь марки 4Х5МФС в процессе производства термически обрабатывается. Этот процесс улучшает механические и технические свойства материала. Обработка происходит в несколько этапов. После их прохождения материал становится более твердым и прочным. Твердость сплава равна 241 мПа.

Главным общим признаком всех сталей, рассчитанных на горячее деформирование, является низкий процент содержания углерода – не выше 0,6 %. Именно этот фактор обуславливает их высокую ударную вязкость.

Таблица 18 – Температура критических точек

Критическая точка	°С
A _{c1}	840
A _{c3}	870
A _{r1}	735
A _{r3}	810
M _n	300

Таблица 19 – Физические свойства

Температура испытания, °С	20	100	200	300	400
Температура испытания, °С	20...100	20...200	20...300	20...400	20...500
Коэффициент линейного расшире-	–	-	-	-	-

ния (α , $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$)					
Коэффициент теплопроводности (λ , Вт/(м×град))	29	30	30	31	33
Удельное электросопротивление (ρ , кг/м ³)	7750	7724	7697	7670	7641

Окончание таблицы 19

Температура испытания, $^\circ\text{C}$	500	600	700	800	900
Температура испытания, $^\circ\text{C}$	20...600	20...700	20...800	20...900	20...1000
Коэффициент линейного расширения (α , $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$)	-	-	-	-	-
Коэффициент теплопроводности (λ , Вт/(м×град))	31	30	28	26	27
Удельное электросопротивление (ρ , кг/м ³)	7600	7573	7546	7520	7495

С целью увеличения рынка сбыта и, как следствие, уровня производства штамповой инструментальной стали предлагаются примерные мероприятия стратегического планирования:

1. Уникальность продукции - поиск и организация разработки предложений клиентам новых видов продукции, обладающих уникальными потребительскими свойствами.
2. Гибкость - умение быстро реагировать на возникшие изменения.
3. Продвижение продукции на рынок и активизация ее сбыта;
4. Высокая отдача на инвестиции;
5. Конкурентное преимущество предприятия;
6. Оперативное решение проблем по качеству продукции;
7. Сегментация рынка (четкая градация потребителей). Ранжирование потребителей предполагает разделение на сл. группы: крупные металлоторговые организации, средние и относительно мелкие. Для каждого из этих сегментов выработан свой набор инструментов. Разработка предложений и реализация мероприятий, направленных на повышение удовлетворенности клиента. Выявление и устранение потенциальных отказов и нарушений технологии, которые могут привести к проблемам с качеством продукции.
8. Определение конечных результатов, связанных с эксплуатацией режущих инструментов.

4 Влияние неметаллических включений на свойства стали

4.1 Классификация неметаллических включений

Как правило, факторами, которые влияют на структуру стали в различные периоды в момент кристаллизации слитка, а также при дальнейшей ее обработки (деформация и термическая обработка), являются количество, состав и распределение неметаллических включений. Часто неметаллические включения служат основной причиной низкого качества литой и деформированной стали.

Неметаллические включения — это химические соединения металлов с неметаллами, находящиеся в стали и сплавах в виде отдельных фаз. Обычно неметаллические включения классифицируют по химическому и минералогическому составам, стойкости и происхождению. В свою очередь, по химическому составу неметаллические включения подразделяют на следующие группы.

1. Оксиды (простые - FeO, MnO, Cr₂O₃, SiO₂, Al₂O₃, TiO₂ и др.; сложные - FeO·Fe₂O₃, FeO·Al₂O₃, Fe₂O₃·Al₂O₃, FeO·Cr₂O₃, MgO·Al₂O₃, 2CaO·SiO₂, 2FeO·SiO₂, 2MnO·SiO₂ и др.).

2. Сульфиды (простые - FeS, MnS, Al₂S₃, CaS, MgS, Zr₂S₃, Ce₂S₃ и др.; сложные (оксисульфиды) - FeS·FeO, MnS·MnO, (Mn, Fe)S·FeO и др.).

3. Нитриды (простые - ZrN, TiN, AlN, CeN, NbN, VN и др.; сложные (карбонитриды) - Ti(C, N), Nb(C, N) и др.), которые встречаются в легированных сталях, в состав которых входят сильные нитридообразующие элементы (титан, алюминий, ниобий, ванадий, церий и др.).

4. Фосфиды (Fe₃P, Fe₂P, Mn₅P₂ и др.).

5. Карбиды (Fe₃C, Mn₃C, Co₃C, Cr₃C₂, W₂C, WC и др.).

6. Интерметаллиды.

Наибольшее количество включений в стали приходится на долю оксидов и сульфидов, так как содержание фосфора обычно низкое. Нитриды присутствуют

										Лист
										48
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР					

только в специальных сталях, в состав которых входят элементы с высоким химическим сродством к азоту.

По минералогическому составу кислородные включения делят на следующие основные группы:

- 1) свободные оксиды - FeO, MnO, Cr₂O₃, SiO₂ (кварц), Al₂O₃ (корунд) и др.;
- 2) шпинели - сложные оксиды, образованные двух- и трехвалентными металлами типа Me²⁺·Me₂³⁺·O₄²⁻, ферриты, хромиты, алюминаты (например, FeO·Fe₂O₃ - магнетит, FeO·Cr₂O₃ - хромит, FeO·Al₂O₃ - герценит);
- 3) силикаты, присутствующие в стали в виде стекол, образованных чистым SiO₂ или SiO₂ с примесями в нем оксидов железа, марганца, хрома, алюминия, вольфрама, а также кристаллических силикатов (орто- и метасиликатов) типа Me₂SiO₄ и MeO·SiO₂, например Fe₂SiO₄ - файялит, Mn₂SiO₄ - тефроит, (Fe, Mg)₂SiO₄ - оливин, Ca(Fe, Mg) SiO₄ - железистый монтичеллит, MnO·SiO₂ - родонит и др.

Самую большую группу неметаллических включений в стали составляют силикаты. В жидкой стали неметаллические включения находятся в твердом или жидком состоянии в зависимости от их температуры плавления (таблица 20).

Таблица 20 - Температура плавления (t_m) и плотность (ρ) неметаллических включений при 20 °С.

№ п.п.	Включения	Температура плавления, (t _m , °С)	Плотность, (ρ, г/см)
1.	Оксиды:		
	FeO		5,8
	Fe ₂ O ₃		5,1-5,2
	MnO		5,5
	SiO ₂		2,2-2,6
	MgO		3,5-3,7
	TiO ₂		4,2
	Al ₂ O ₃		4,0
	Cr ₂ O ₃		5,0
	ZrO ₂		5,75
	Магнетит		
	FeO·Fe ₂ O ₃		4,9-5,9
	Ферриты кальция:		
	2CaO·Fe ₂ O ₃		4,68
	CaO·Fe ₂ O ₃		4,35
	Ортосиликат марганца 2MnO·SiO ₂		3,95-4,12
	Метасиликат марганца MnO·SiO ₂		3,58-3,70
	Силикаты железа		
	(< 40 % SiO ₂)	1180-1380	4,0-5,8
	Силикаты железа		
	(> 40 % SiO ₂)	1380-1700	2,3-4,0

	Силикаты марганца (15-50 % SiO ₂)	1210-1600	4,0-5,0
	Силикаты глинозема Al ₂ O ₃ ·SiO ₂		3,05
2.	Сульфиды:		
	FeS		4,5-4,9
	MnS		3,8-4,0
3.	Нитриды:		
	VN		5,47-5,97
	TiN		5,1-5,4
	ZrN		6,93-7,10
4.	Фосфиды Fe ₂ P		6,74-7,13

По стойкости неметаллические включения разделяют на устойчивые и неустойчивые.

К неустойчивым относятся включения, которые растворяются в разбавленных кислотах (не более 10 %-ной концентрации). Неустойчивыми являются сульфиды и оксиды железа, марганца, мелкие включения нитридов алюминия и др.

Наиболее устойчивые включения — кварц SiO₂, корунд Al₂O₃, оксиды Cr₂O₃, ZrO₂ и др., ряд шпинелей и нитридов, в том числе крупные включения нитрида алюминия, а также некоторые сульфиды и оксисульфиды РЗМ. В связи с тем, что газовые включения в стали также являются неметаллическими, включения типа оксидов и сульфидов иногда называют шлаковыми.

В зависимости от размера различают:

1) микровключения - обнаруживаются на шлифе только под микроскопом при увеличении не менее 50 крат (обычно применяют увеличения от 100 до 600, а в некоторых случаях - до 1000 и даже 1500 крат);

2) макровключения - видны в изломе или на поверхности стали (лучше полированной) невооруженным глазом или при незначительном увеличении (при помощи лупы).

При металлографическом контроле имеется возможность установить характер расположения включений в металле. Контролер качества металла фиксирует в паспорте плавки наличие включений глобулярной формы, строчечных включений и т. п.

В сталь могут попадать включения из:

1) шихтовых материалов — чугуна и скрапе;

2) огнеупорной футеровки печи, желоба, ковша и т. п. как результат «вымывания» от механического воздействия металла;

3) образовавшиеся в течение технологического процесса плавки:

- при взаимодействии металла со шлаком (например, при переходе кислорода или серы из шлака в металл);

- в момент введения в металл раскислителей или легирующих элементов;

- выделения из металла при кристаллизации стали вследствие уменьшения их

растворимости при понижении температуры.

Практика показывает, что последний фактор в большинстве случаев является основным.

Лишь в некоторых случаях: при плохом состоянии футеровки агрегата или отсутствии контроля состояния футеровки ковша, желоба и т. д. - доля внесенных таким образом включений становится заметной. Эти включения можно легко отличить под микроскопом по их относительно большим размерам и по виду. Включений, вносимых шихтой, обычно немного, и они сравнительно легко удаляются в первые периоды плавки. Неметаллические включения, образующиеся в результате реакций, протекающих в жидком или затвердевающем металле, называют природными или эндогенными; случайные, посторонние включения называют экзогенными.

Строгое соблюдение правил ухода за футеровкой и правильная технология ведения плавки обеспечивают получение металла с незначительным количеством включений, гарантируют изменение в желательном направлении состава включений, а также успешное удаление образовавшихся включений в шлак. Обычно в стали массовое содержание включений составляет 0,01 - 0,02 %, причем их количество и состав определяются типом процесса, качеством шихтовых материалов и принятой технологией производства.

4.2 Влияние включений на свойства стали

Последнее время, особенно в XXI веке, за счет накопления знаний существенно изменились подходы к высоконадежным конструкционным материалам. Среди факторов, в наибольшей мере снижающих срок эксплуатации металлоизделий, все большее значение приобретают оксидные неметаллические включения. Загрязненность ими готовой металлопродукции традиционно регламентируют посредством ограничения содержания серы и кислорода в металле, и характеризуют уровнем балльности и максимально допустимого размера включений.

Неметаллические включения практически не влияют на "объемные" процессы пластической деформации и упрочнения, но разнообразно проявляют себя в локальных процессах - в разрушении, а также в формировании зерна и фазового состава стали.

От неметаллических включений во многом зависят как технологические (технологическая пластичность, разливаемость), так и механические (ударная вязкость) и эксплуатационные свойства (стойкость к коррозии) стали.

Основным видом включений в стали являются оксиды. Современные требования к стали различных типов по содержанию кислорода и максимальному размеру оксидов приведены ниже в таблице 21.

Таблица 21 - Максимально допустимое содержание кислорода и размер неметаллических включений в сталях различных типов.

Назначение стали	[O] _{max} , %	D _{НВ} ^{max} , МКМ
------------------	------------------------	--------------------------------------

Для автолиста	0,004	100
Для глубокой вытяжки	0,002	20
Для магистральных газо- и нефтепроводов	0,003	100
Шарикоподшипниковая	0,001	15
Кордовая	0,0015 ; 0,005*	10; 20
Для судостроения, платформ буровых станций, мостов	0,002	200
Для изготовления проволоки	0,003	20
Рельсовая	0,002**	500**
Для корпусов атомных реакторов	0,0025	Н.д.
Роторная	0,002***	Н.д.

* Катанка сорбитизированная из высокочистой стали для металлокорда диам. 5,5-6,5 мм. ТУ 14-1-4752-89. ГУП "БМЗ"

** ГОСТ Р 51685-2000. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия

*** Спецификация на St. 152 (10 % Cr и 10 % Ni)

Указанные значения рассматриваемых характеристик установлены, исходя, с одной стороны, из наработанного массива данных о влиянии балла неметаллических включений на конкретные механические, технологические и служебные свойства материалов, а, с другой, из технологической связи между баллом включений и содержанием кислорода в металле. Примеры подобных зависимостей, полученные при исследовании низколегированной марганцовистой стали приведены на рисунке 5 и рисунке 6. Из представленных графиков видно, что, например, загрязненность металла по оксидам на уровне первого-второго балла (ГОСТ 1778-70) отвечает общей концентрации кислорода около 0,002 %.

Для получения металла, содержание кислорода и максимальный размер неметаллических включений в котором удовлетворяют требованиям, приведенным в таблице 21 необходимо не только правильно организовать технологию глубокого раскисления, но и обеспечить удержание достигнутого уровня окисленности металла вплоть до окончания его затвердевания. Последнее достигается за счет предотвращения взаимодействия металлического расплава с окисляющими фазами, к которым, прежде всего, относятся шлак и атмосфера. Кроме того, заметное влияние на уровень содержания кислорода в стали может оказывать его взаимодействие с футеровкой.

а)

б)

Рисунок 5 - Влияние балла включений (а) и их размера (б) на ударную вязкость трубной стали (исследование балльности проводили методом "Ш" по ГОСТ 1778-70; основная доля включений, имеющих максимальный размер, по ГОСТ 17787-70 относится к силикатам недеформируемым)

Рисунок 6 - Влияние загрязненности трубной стали металлическими включениями на содержание в ней кислорода (максимальный балл преимущественно имели включения, по ГОСТ 1778-70 относящиеся к силикатам недеформируемым)

При содержании серы в металле более 0,01 % может возникнуть эффект красносломкости стали, обусловленный наличием сульфида железа FeS. Эвтектика Fe-FeS плавится при 975 °С. Оттесняемый фронтом кристаллизации легкоплавкий сульфид FeS, образует жидкие пленки вокруг дендритов. В затвердевающей слитке на выходе из кристаллизатора перепад температуры доходит до 400...500 °С, и от термических напряжений по пленкам идут кристаллизационные трещины. Эти пленки оплавляются и при нагреве под прокатку, так что слиток при обжати разваливается - сталь горячеломкая.

Для предотвращения кристаллизационных трещин и горячеломкости почти во все стали вводят марганец: 0,25...0,80 % в рядовой углеродистой стали по ГОСТ 380-2005. Цель избавиться от эвтектики, заместив сульфид железа на сульфид марганца. В слябе непрерывной разливки гарантией против кристаллизационных трещин считают пропорцию $[Mn]:[S] > 40...50$ и даже $[Mn]:[S] > 60$. В тонком слябе, вытягиваемом с большой скоростью, продольные поверхностные трещины предотвращались лишь при $< 0,008 \% S$. При дальнейшей переработке, при охлаждении слитка и при нагреве под прокатку, сульфид железа обогащается марганцем в твердом состоянии. Он полностью превращается в сульфид марганца за 1 час при 1100...1200 °С, и тогда горячеломкость предотвращается, если в стали $[Mn]:[S] > 25$.

Сульфиды марганца мягкие, пластичны при 950...1100 °С, а при размере частиц менее 1 мкм они не деформируются. Наиболее опасны сульфиды - дендриты, при прокатке они вытягиваются в плоские пучки нитей и даже при холодной деформации удлиняются почти так же, как сам металл.

4.3 Причины образования неметаллических включений

Исследование раскислительной способности отдельных элементов показало термодинамическую возможность образования разных продуктов раскисления, в том числе и сложных, состоящих из двух и более оксидов. Эти продукты раскисления выделяются в виде оксидной фазы, образующей отдельные неметалличе-

										Лист
										53
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР					

ские включения. Возникновение новой фазы в гомогенной среде, как и в процессе окисления углерода, связано с образованием новой поверхности раздела и требует преодоления энергии межфазного натяжения.

Вместе с тем имеются отличия, связанные с отсутствием изменения давления и влияния его на термодинамические параметры процесса. Рассмотрим влияние размера зародыша продукта раскисления на возможность его роста, используя общую теорию процессов фазовых превращений, развитую В. Гиббсом, М. Фольмером и отечественным ученым Я. И. Френкелем.

При протекании реакции раскисления изменение свободной энергии системы равно сумме изменений свободной энергии химической реакции и работы образования новой поверхности раздела между старой и новой фазами:

$$\Delta G = V(\rho/\mu) \cdot (G_2 - G_1) + \alpha \cdot \sigma \quad (9)$$

где V и α - объем и поверхность кристаллического зародыша;
 ρ и μ плотность и молекулярная масса продукта раскисления;
 G_1 , и G_2 - молярная свободная энергия системы до и после химической реакции;
 σ - поверхностное натяжение на границе фаз металл-зародыш неметаллического включения.

Если зародыш сферический и имеет радиус r , то

$$\Delta G = (4/3) \cdot \pi \cdot r^3 (\rho/\mu) \cdot (G_2 - G_1) + 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \sigma \quad (10)$$

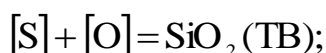
Как и зарождение пузырька, процесс раскисления может протекать лишь в случае, когда $G_2 < G_1$. При этом знак изменения ΔG зависит от величины r , так как при малых ее значениях $r^3 < r^2$, а при больших $r^3 > r^2$. Соответственно, при малых r с его увеличением ΔG возрастает, а при малых величинах уменьшается. При некотором критическом значении $r=r_{кр}$ ΔG максимально.

Критический радиус зародыша может быть определен, если производную ΔG [уравнение (10)] по r приравнять нулю:

$$\begin{aligned} d\Delta G / dr &= (4\pi \cdot r_{кр}^2 (\rho/\mu) \cdot (G_2 - G_1) + 8\pi \cdot r_{кр} \cdot \sigma = 0 \\ r_{кр} &= [2\sigma / (G_1 - G_2)] (\mu/\rho), \end{aligned} \quad (11)$$

но $G_1 - G_2 = RT \ln (K_2/K_1)$, где K_2 - константа равновесия, а K_1 - соотношение исходных концентраций компонентов.

Например, для реакции раскисления кремнием



$$K_2 = \alpha_{SiO_2(\rho)} / ([Si]_{(\rho)} [O]_{(\rho)}^2);$$

$$K_1 = \alpha_{SiO_2(u)} / ([Si]_{(u)} [O]_{(u)}^2), \quad (12)$$

где (ρ) и (u) означают концентрации компонентов в исходном и равновесном состояниях. Учтя, что $\alpha_{SiO_2} = 1$, получим для этой реакции:

$$G_1 - G_2 = RT \cdot \ln \frac{[Si]_{(u)} [O]_{(u)}^2}{[Si]_{(\rho)} [O]_{(\rho)}^2} = RT \cdot \ln \frac{C'}{C}, \quad (13)$$

где C'/C - пересыщение, необходимое для развития процесса раскисления. Следовательно, (14) можно записать в виде

$$r_{кр} = (2\sigma\mu) / [RT \cdot \rho \ln(C'/C)] \quad (14)$$

Таким образом, для развития процесса раскисления необходимо образование зародыша новой фазы продукта раскисления не менее критического радиуса. При увеличении поверхностного натяжения для сохранения критического радиуса требуется существенное повышение перенасыщения расплава. Образование зародышей критического радиуса происходит в результате флуктуаций массы и энергии. С использованием теории флуктуаций была рассчитана интенсивность образования новой фазы в гомогенной жидкости.

Вероятность образования зародышей оксидной фазы в жидком металле можно оценить, пользуясь уравнениями теории зарождения новой фазы:

$$J = A \exp[-\Delta G^* / (RT)] \quad (15)$$

в котором изменение свободной энергии при образовании зародыша

$$\Delta G^* = (16\pi/3) [\mu_B^2 \sigma_{M-B}^3] / [\rho^2 R^2 T^2 (\ln C'/C)^2] \quad (16)$$

где J - число зародышей, возникающих в единицу времени в 1 см^3 ;

A - коэффициент, учитывающий число атомов на поверхности зародыша критического размера и в единице объема исходной фазы и зависящий от межфазного натяжения на границе металл-включение.

4.4 Образование неметаллических включений

Образование карбидов

В процессе аустенитизации происходит растворение (частичное или полное) частиц вторичной фазы (карбидов, карбонитридов, интерметаллидов и др.) и пе-

										Лист
										55
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР					

реход легирующих элементов в раствор, т.е. легирующие элементы могут находиться в твердом растворе железа или в карбидной фазе. Кроме этого они могут также присутствовать в составе неметаллических включений (Cr, Mn, Al, Zr, V, Ti в виде оксидов – MnO, SiO₂, Al₂O₃, Cr₂O₃, V₂O₃, B₂O₃, ZrO, TiO₂ или сульфидов - MnS, ZrS).

К карбидообразующим легирующим элементам относятся: Fe, Mn, Cr. Mo, W, Nb, V, Zr, Ti - по возрастающей степени сродства к углероду и устойчивости карбидных фаз.

К легирующим элементам, не участвующим в процессе карбидообразования (некарбидообразующим), относятся: (Ni, Co, Al, Si, Cu).

В связи с тем, что температура диссоциации частиц вторичной фазы, образованной сильными КОЭ (Ti, Nb, Zr, V) достаточно высокая (1150-1250 °C), за исключением ванадия, который переходит в твердый раствор при 950 °C, при традиционных режимах нагрева под закалку такие легирующие элементы будут находиться в связанном состоянии (в частицах вторичной фазы). Поэтому в практике термообработки используют повышенные температуры аустенитизации для частичного растворения таких частиц вторичной фазы и перевода легирующих элементов в твердый раствор с последующим выделением их при отпуске в виде дисперсных частиц карбидов. При этом используют повышенные температуры аустенитизации, когда достигается максимально возможная степень растворения частиц вторичной фазы, но еще не происходит интенсивного роста аустенитного зерна. В случае интенсивного охлаждения металла с температуры аустенитизации - после закалки (или ускоренного охлаждения) фиксируется пересыщенный твердый раствор – мартенсит (по углероду, азоту, легирующим элементам), в котором при последующем нагреве (отпуске) происходит распад твердого раствора с выделением частиц вторичной фазы (карбидов, карбонитридов и др.), многие из которых относятся к фазам внедрения и образуются между переходными металлами и углеродом (азотом).

Фазы внедрения образуются при соотношении атомных радиусов компонентов $R_{\text{нсм}}/R_{\text{мет}} = 0,41 \dots 0,59$ (карбиды типа TiC; NbC; ZrC; VC; WC; Mo₂C; W₂C), а в том случае, если это соотношение будет $R_{\text{нсм}}/R_{\text{мет}} > 0,59$ фазы внедрения не образуются, а возникают карбиды со сложной атомно-кристаллической структурой (карбиды железа, марганца, типа Me₃C, хрома - Cr₃C₂; Cr₇C₃; Cr₂₃C₆ - при концентрации хрома менее 2% образуется легированный цементит, а при большем содержании образуется Cr₇C₃).

Следует отметить, что эффект дисперсионного твердения при отпуске или старении могут вызывать частицы вторичной фазы, размер которых £100 нм (10--100 ангстрем), а расстояние между ними не более 20...100 нм (200...1000 Å). Такими частицами вторичной фазы чаще всего являются – VC; VN; NbC; NbN; V(C,N) и др.

По кристаллохимической структуре карбиды, наиболее часто встречающиеся в сталях, можно разделить на несколько групп:

1. Карбиды цементитного типа с орторомбической решеткой (отвечающие со-

					220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

ставу $(Fe, Me)_3C$, где Me может быть хром (<1,8 %), марганец (<1,8 %), молибден (<0,4 %), вольфрам (<1,0 %), ванадий (<0,3) %, титан, ниобий, тантал (<0,25 %), и др., которые растворяются в цементите. При этом концентрация КОЭ в легированном цементите выше, чем в аустените. Элементы, которые не образуют карбидов, находятся преимущественно в аустените, а концентрация их в легированном цементите ниже среднего содержания в стали. При малом содержании таких КОЭ - Mn, Cr, W, Mo они растворяются в цементите, заменяя в нем атомы железа. Марганец может заменить в Ц все атомы железа, хром до 25%, молибден до 3%, вольфрам - до 0,8-1,0%. Более сильные КОЭ - титан, ниобий, ванадий и др. практически не растворяются в цементите, образуя собственные карбиды.

2. Фазы внедрения (специальные карбиды - образуются в сталях, когда концентрация легирующих элементов превышает предел их растворимости в цементите):

а) карбиды типа MeC , имеющие кубическую решетку, где Me могут быть ниобий, тантал, ванадий, цирконий;

б) карбиды типа MeC и Me_2C , имеющие гексаганальную решетку, где Me могут быть молибден, вольфрам;

3. Карбиды типа $Me_{23}C_6$ с кубической решеткой:

а) кубический карбид хрома и его производные с общей формулой $(Cr, Me)_{23}C_6$: где Me железо, марганец, молибден, ванадий, вольфрам, никель;

б) кубический карбид молибдена (вольфрама) типа $Fe_{21}(Mo, W)_2C_6$:

4. Тригональный карбид хрома $(Cr, Me)_7C_3$, где: Me—железо, марганец, молибден, ванадий, вольфрам, никель.

5. Двойные карбиды общей формулы Me_6C : типа $Me_n^1Me_n^2C$ и типа $Me_n^1Me_{2n}^2C$, где: Me^1 - железо, кобальт, никель; Me^2 -вольфрам, молибден, хром, ванадий.

В связи с тем, что диффузионная подвижность легирующих элементов существенно меньше, чем углерода и азота, то при температурах отпуска примерно до 400°C в пересыщенной матрице не происходит перераспределения легирующих элементов.

Скорость протекания первой стадии распада мартенсита мало изменяется при легировании такими элементами как хром, молибден, вольфрам, кремний. При введении больших количеств никеля температура распада понижается, а при введении алюминия температура начала распада значительно повышается.

Легирование существенно изменяет кинетику второй стадии распада M, замедляя рост карбидных частиц и сохраняя пересыщенность твердого раствора до более высоких температур отпуска. Вторая стадия распада значительно замедляется и сдвигается в сторону более высоких температур (до ~400-450 °C вместо ~150-300 °C в углеродистых сталях) такими элементами, как хром, молибден, ванадий, вольфрам, кобальт, кремний.

Выделение метастабильного ε-карбида в легированных сталях происходит при более высоких температурах (в углеродистой стали могут быть уже при ~20 °C, а в легированной при ~120-140 °C). Цементитные выделения в кремнистых сталях

										Лист
										57
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР					

появляются лишь при $\sim 370\text{ }^{\circ}\text{C}$

При температурах выше $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ начинается перераспределение легирующих элементов и образование специальных карбидов. Возможны два механизма их образования:

- концентрация легирующих элементов при повышении температуры отпуска в цементите увеличивается и цементит перестраивается в специальный карбид;
- специальный карбид образовывается самостоятельно, при этом зарождение на дефектах значительно легче.

При этом следует отметить, что из-за существенно меньшей диффузионной подвижности легирующих элементов частицы специальных карбидов значительно дисперснее цементита. Карбидообразование легированных частиц вторичной фазы также проходит через стадии метастабильных карбидов. При выделении специальных карбидов в сталях происходит повышение пределов текучести, пропорциональности, твердости. Это явление получило название вторичное твердение. Обычно такой эффект наблюдается при отпуске $500\text{-}650\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для цементита при $350\text{-}400\text{ }^{\circ}\text{C}$). Важным фактором является и то, что при вторичном твердении повышается пластичность и вязкость, что обусловлено частичным растворением и сфероидизацией частиц цементита.

Легирование также влияет и на скорость коагуляции карбидных частиц. Никель ускоряет, а хром, молибден, вольфрам, ванадий замедляют коагуляцию.

Легирующие элементы (хром, кремний и др). повышают температуру распада и остаточного аустенита до $500\text{-}600\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.5 Удаление неметаллических включений

Удаление включений продуктов раскисления происходит в результате перехода их в шлак или в футеровку, с которой контактирует металл. Процесс этот состоит из нескольких последовательных стадий: перемещения в объеме металла и подхода к межфазной границе металл-адсорбирующая фаза; перехода через межфазную границу; поглощения шлаком. Решающее влияние на скорость процесса оказывают перемещение включений в металле и доставка их к межфазной границе. В спокойной жидкости, когда массоперенос не влияет на траекторию движения частиц, скорость всплывания частиц сферической формы определяется формулой Стокса:

$$\omega = (2/9)[gr^2(\rho_m - \rho_{ш})]/\eta, \quad (25)$$

где g - ускорение силы тяжести;

r - радиус частицы;

ρ_m и $\rho_{ш}$ - соответственно плотность жидкого металла и шлака;

η - вязкость металла.

Согласно формуле Стокса решающее влияние на скорость всплывания оказывает радиус частиц. Поэтому для более быстрого очищения стали от продуктов раскисления желательно получать по возможности крупные глобулярные вклю-

									Лист
									58
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР				

чения. Расчеты показывают, что крупные жидкие частицы $n\text{FeO} \cdot m\text{Al}_2\text{O}_3$ достаточно быстро всплывают из стали:

Диаметр частицы, мкм	30	30	100	100
Плотность частицы, t/m^3	3,9	3,0	3,9	3,0
Скорость всплывания, мм/мин	90	117	1000	1304

Следовательно, в сталеплавильных печах даже из нижних горизонтов металлической ванны 0,1-мм включения всплывают в течение ≤ 1 мин, а 30-мкм - в течение 5...10 мин. В сталеплавильных ковшах продолжительность всплывания в 2...4 раза больше.

Частицы продуктов раскисления укрупняются, главным образом, вследствие их соединения. Оно осуществляется в результате коалесценции (слияния) жидких частиц, коагуляции (спекания) твердых частиц, адгезии (прилипания) жидких частиц к твердым. Наиболее интенсивно укрупнение происходит в результате коалесценции жидких частиц, между которыми при соударениях получается относительно большая поверхность контакта. Поэтому жидкие включения достигают относительно больших размеров (до 30... 100 мкм и более) и быстро всплывают.

Всплывание крупных жидких включений имеет важное значение при раскислении всеми раскислителями, в том числе и сильными раскислителями (Al, Zr, Ti), чистые оксиды которых тугоплавки, но вместе с FeO образуют легкоплавкие включения. Об этом свидетельствует, например, быстрое снижение общего содержания кислорода после присадки алюминия в перемешиваемую ванну, а также наличие крупных глобулярных продуктов раскисления алюминием лишь в первые минуты раскисления [5].

Твердые включения, в частности корунда, плохо укрупняются и, имея малые размеры (3... 8 мкм), медленно всплывают. К тому же частицы корунда имеют неправильную форму и при всплывании они «парят», двигаясь не по вертикали, а по сложным траекториям. С уменьшением размеров степень парения уменьшается, но интенсифицируется броуновское движение. Вследствие этого скорость всплывания твердых включений корунда незначительна и их всплывание не имеет практического значения.

Подвод включений корунда и других мелких твердых частиц неправильной формы к поверхности металла со шлаком и с футеровкой осуществляется, главным образом, в результате массопереноса их с потоками металла. Поэтому удаляются они интенсивно лишь при перемешивании. Преимущественно это происходит в ковше во время выпуска металла из печи и, в меньшей мере, во время разливки. Подводу включений корунда способствует их сложная неопределенная форма и, вследствие этого, значительные моменты инерции и гидравлическое сопротивление, препятствующее перемещению легких (по сравнению с металлом) частиц в сторону больших скоростей, т. е. от межфазной границы в глубь металла.

					220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		59

4.6 Методы удаления неметаллических включений

4.6.1 Модифицирование включений

Модифицирование сульфидов с целью повышения пластичности и вязкости.

Вредное влияние деформируемых сульфидов марганца, резко увеличивающих энергию границы раздела включение-матрица, подавляется десульфурацией стали, использованием поперечной прокатки и модифицированием сульфидов, т.е. изменением их морфологии. Наиболее эффективным средством управления формой включений является модифицирующая обработка, приводящая к глобуляризации и измельчению сульфидных включений, изменению их химического состава и свойств. Глобуляризация включений при модифицировании, несколько увеличивая средний размер включения, приводит к увеличению межчастичного расстояния и соответственно к эффективному увеличению размера ямок вязкого излома, что должно сопровождаться увеличением вязкости стали.

Наиболее известными модифицирующими добавками являются РЗМ, Ti, Ca и Zr. Эти элементы образуют более устойчивые сульфиды, чем марганец, не деформируемые в процессе горячей деформации.

Титан

Повышение содержания титана в стали до 0,07...0,16 % наряду с диспергированием частиц сульфидов вызывает изменение их формы, они становятся более хрупкими и менее деформируемыми. Это связано с образованием соединения TiS. Пластичность сульфида ((Mn, Ti)S) много ниже пластичности MnS, что должно обеспечить уменьшение деформируемости включений. Использование титана в качестве модификатора сульфидов возможно только в низкоуглеродистых сталях ($C < 0,1 \%$) из-за его высокой способности к карбидообразованию. Карбосульфиды $Ti_4C_2S_2$ выделяются по границам зерен и оказывают охрупчивающее действие еще до того, как прошло полное замещение марганца титаном в MnS.

Цирконий

Пластичность сульфидов циркония, как и сульфидов титана, невелика, поэтому при деформации крупных сульфидов происходит раскалывание их. Максимальное содержание циркония в тройных сульфидах соответствует формуле $Mn_{0,8}Zr_{0,2}$. Цирконий практически не оказывает влияния на прочность стали, но увеличивает ее пластичность и вязкость. Максимальный эффект повышения вязкости при содержании, циркония около 0,03 %. При большем содержании циркония снижение вязкости обусловлено увеличением количества включений, в том числе карбонитридов циркония.

Редкоземельные металлы (РЗМ)

Эти металлы образуют твердые тугоплавкие труднодеформируемые соединения, содержание редкоземельный элемент и серу, или оба элемента с кислородом. В результате оптимальной обработки стали РЗМ вытянутых включений сульфи-

										Лист
										60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР					

дов марганца не наблюдается. Вследствие высокого сродства РЗМ к кислороду сначала происходит связывание кислорода, а затем серы. При недостаточном количестве РЗМ происходит глобуляризация не всех сульфидов и сульфида $(\text{РЗМ})_3\text{S}_4$ сосуществуют с вытянутыми MnS . Избыток РЗМ (выше 0,005...0,02 % в зависимости от содержания серы в стали) способствует образованию соединения железа с церием и выделению включений по границам зерен в виде эвтектики, что приводит к снижению горячей пластичности стали.

Кальций

Растворимость кальция в твердом растворе стали очень мала. При введении кальция в жидкий металл происходят процессы раскисления, обусловленные высоким сродством кальция к кислороду, десульфурации и модифицирования сульфидов [8]. Сульфиды CaS более стабильные, чем MnS . Как правило, в хорошо раскисленной стали образуются соединения, содержащие Ca , Mn , S .

CaS и MnS являются изоморфными фазами, но не образуют непрерывного ряда твердых растворов. CaS - труднодеформируемое соединение, которое при прокатке сохраняет глобулярную форму, что позволяет исключить вредное влияние вытянутых неметаллических включений на механические свойства стали.

Так как CaS менее стабильное соединение, чем CaO , то типично присутствие CaS в виде оболочки вокруг оксидов, содержащих Ca и Al , поскольку оксиды выделяются на ранней стадии кристаллизации стали и оказываются связанными с сульфидной фазой.

Модифицирование оксидных включений с целью повышения сопротивления усталости.

Отрицательное влияние твердых недеформируемых оксидных включений на усталостные характеристики стали хорошо известно. Хотя присутствия оксидных включений в стали избежать нельзя, включения можно изменить, снизив их критический размер и твердость, чтобы уменьшить их отрицательное влияние. Добавка в сталь РЗМ существенно повышает ее долговечность. Это достигается благодаря модификации химического состава включений, снижения их среднего размера, а также улучшения чистоты стали. Отмечено положительное влияние образования сульфидной оболочки на оксидах.

В подшипниках в условиях контактной усталости у подповерхностных оксидов, не покрытых оболочкой, происходит изменение микроструктуры и образование трещин [8]. Это изменение известно как образование "бабочки". Под действием циклического напряжения по краям "крылышек" этой бабочки зарождаются микротрещины, которые, в конце концов, распространяются до поверхности. Ни "бабочка", ни микротрещины не образуются, если оксиды покрыты пленкой сульфидов. Образование двойных включений (оксиды, покрытые сульфидами) обеспечивает также течение стальной матрицы при горячей обработке без каких-либо микротрещин в матрице. Сульфиды, выделяющиеся на оксидах, создают гладкую поверхность раздела между включениями и матрицей в отличие от остроугольной поверхности в случае оксидов, не имеющих покрытия.

Структурные напряжения в случае двойных оксидно-сульфидных включений меньше, чем в случае одних оксидных включений того же размера. Поскольку большинство сульфидов при нормальных температурах пластичны, они уменьшают концентрацию напряжений, поглощая напряжения, создаваемые оксидами, которые они покрывают.

4.6.2 Применение сталеплавильных агрегатов

Существующие современные способы производства стали и сплавов не дают возможности получить металл, не содержащий неметаллических включений. Больше или меньшее количество включений содержится в любой стали в соответствии с её составом и условиями производства. Обычно объёмная доля неметаллических включений в стали не превышает 0,1 %. Однако, в связи с их малыми размерами, число включений в металле очень велико.

Выплавка стали только в одном сталеплавильном агрегате (дуговой или мартеновской печи, конвертере) не обеспечивает чистоту металла, которая обусловлена современными техническими условиями, она может быть улучшена только в узких пределах за счёт раскисления. Это привело к созданию новых сталеплавильных процессов, соответствующих современному уровню развития техники. Одним из элементов таких технологий является внепечная обработка стали. Она обеспечивает получение не только высокого, а в ряде случаев нового качества, но и повышение производительности сталеплавильных агрегатов.

Для решения вопросов чистоты стали по неметаллическим включениям наиболее широко распространены такие процессы, как обработка металла вакуумом в ковше (VAD, VOD, RH, DH и другие) и переплавные процессы (ЭШП, ВДП).

Процесс VAD применяется для производства легированных конструкционных и инструментальных сталей.

Для сталей, обработанных процессом VAD характерно уменьшение количества неметаллических включений до (0,04 - 0,09) % (объёмн.), а также уменьшение их размеров (3 - 4 балла по шкале SEP 1570 – 61) /44, 45/.

Фирмой VEW было проведено сравнение чистоты сталей, полученных по трём различным технологиям: выплавкой в дуговой печи, обработкой процессом VAD и переплавом в ЭШП. Оценка чистоты прутков из стали диаметром (150 - 450) мм показала, что для двух последних процессов она одинакова, тогда как сталь, выплавленная в дуговой печи, является менее чистой, а разброс результатов шире, чем для двух других процессов (рисунок 5).

Повышение качества стали сопровождается дополнительными затратами, которые в среднем увеличиваются в соотношении 1:1,05:1,6, для производства в дуговой печи, процессами VAD и ЭШП соответственно. Увеличение затрат при использовании процесса VAD по сравнению с дуговой плавкой создаёт более высокое качество, чем это обеспечивает соответствующее увеличение затрат на процесс ЭШП.

Процесс VOD является ведущим для производства коррозионностойких сталей. Этот процесс даёт минимальное загрязнение стали неметаллическими вклю-

чениями (содержание оксидов по шкале SEP 1570 в пределах 3 - 4 балла) /44/ и примесными элементами. Наблюдается улучшенная способность к формоизменению за счёт высокой чистоты металла.

Электрошлаковый переплав (ЭШП) позволяет удалить до 75 % неметаллических включений, содержащихся в исходном металле. Однако при этом образуются вторичные включения вследствие окисления переплавляемого металла кислородом воздуха и переходящим из рафинировочного шлака. В зависимости от условий проведения плавки состав и количество вторичных включений могут быть различными.

В сталях, подвергнутых ЭШП более низкое содержание сульфидов, обусловленное удалением серы во время переплава, низкое содержание включений типа силикатов вследствие использования основного шлака. Глобулярные включения часто имеют малые размеры в связи с присутствием СаО в шлаке. Содержание кислорода после ЭШП почти не уменьшается, но количество и размеры всех включений уменьшаются, а их распределение становится более равномерным.

Обработка металла на установке ковш-печь (УКП) позволяет повысить чистоту стали по содержанию оксидных, сульфидных и глобулярных включений, а также снизить содержание кислорода.

Установки ковш-печь находят всё более широкое применение, что обусловлено простотой установок и используемых технологий, возможностью обеспечивать достаточно высокое качество стали при относительно небольших затратах.

Кроме агрегата внепечной обработки, существенное влияние на распределение включений оказывает модифицирование стали. Лигатуры на основе кальция, магния или РЗМ используют для частичного удаления остаточных неметаллических включений из стали и регулирования состава и морфологии остаточных включений. Так, например, обработка стали кусковым силикокальцием снижает загрязнённость крупными (> 3,0 балла по шкале ASTM E45) включениями типа В (строчные оксиды) на (30 - 40) %; при этом несколько увеличивается общее количество полей зрения с включениями типа D (глобули). После модифицирования силикокальцием в виде проволоки с наполнителем полностью отсутствуют крупные включения типа В, но резко возрастает количество глобулярных включений, размеры которых не превышают 2,0 балла.

4.7 Методы исследования неметаллических включений

Для изучения неметаллических включений применяют две группы методов:

1. Металлографические методы, в которых объектом исследования является тщательно подготовленная поверхность образца. На поверхности образца выявляются включения и путем применения различных способов анализа, устанавливается их количественное содержание и качественная характеристика.

2. Методы выделения и последующего изучения, изолированных от металла включений.

При металлографическом исследовании включения выявляют на поверхности

										Лист
										63
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР					

образца металла. Объектом исследования должна быть шлифованная, полированная или просто механически обработанная поверхность образца металла, а также поверхности излома или среза. Качественными признаками распознавания включений, обнаруживаемых невооруженным глазом или под микроскопом, являются цвет, форма, размеры, изменение формы вследствие пластической деформации, способность отражения света и отношение к различным химическим реактивам.

При изучении неметаллических включений рекомендуется начинать исследование с простого осмотра образцов металла, а затем переходить к просмотру под металлографическим микроскопом вначале при небольших и далее при более сильных увеличениях.

При микроскопических исследованиях из слитков или изделий в требуемых местах вырезают образцы с линейными размерами 10...40 мм, одну из поверхностей которых полируют и рассматривают под металлографическим микроскопом. Тип и состав включений определяют по их виду, цвету, форме, при различном освещении. Для четкой идентификации включений требуется определенный опыт. Загрязненность стали включениями оценивается по стандартным шкалам, обычно пятибалльным. Этот метод носит главным образом качественный характер.

В последние годы, для исследования неметаллических включений используются микронзонды, основанные на отражении от образцов рентгеновского излучения. Наиболее известны приборы типа Камека. Они позволяют изучать химический состав включений на площади диаметром 2...5 мкм.

Для контроля качества стали по степени загрязненности включениями нет крайне важности подсчитывать все включения и определять их общее содержание обычно на небольшом числе образцов устанавливают наличие включений максимальной величины, так как именно они оказывают наиболее вредное влияние на свойства металла.

Методы определения общего содержания предусматривают подсчет всех включений, при этом исследуется обычно значительное число образцов.

Учитывая зависимость от принципа определения количества включений применяемые методы подразделяются на две основные группы;

- 1) методы сравнения с эталонными шкалами;
- 2) методы измерения суммарной площади включений с последующим определением объёмного или весового процента содержания включений в металле.

Метод сравнения с эталонными шкалами и метод определения суммарной площади включений отличается своей трудоемкостью и их результаты в какой-то мере зависят от субъективного подхода исследователя.

В этом отношении совершенным является новый метод автоматического подсчета включений, основанный на различной отражательной способности включений и металлической матрицы. Сульфидные включения имеют более низкую отражательную способность, чем металл; в свою очередь отражательная способность оксидных включений ниже, чем у сульфидных.

Метод воплощен в электронную установку, которая позволяет быстро и дифференцированно подсчитать отдельно включения сульфидов и оксидов на обыч-

ных металлографических шлифах. Установка отличается компактностью и сравнительной простотой и дает возможность за одну операцию произвести подсчет включений на площади шлифа до 17 мм. Вместе с тем, на установке можно определить долю сульфидных и оксидных включений и распределение их по размерам (при минимальном размере частиц 2 мкм).

Металлографический метод изучения включений, несмотря на многие его преимущества, в ряде случаев не позволяет установить точный химический и минералогический состав включений и дает возможность приближенно определить количественное содержание включений. Более удобным объектом исследования с этой точки зрения являются неметаллические включения, извлеченные тем или иным способом из металла.

Выделять включения можно химическим или электролитическим растворением металла.

При использовании этих методов крайне важно стремиться к тому, чтобы включения по возможности остались неразрушенными, были выделены в том виде, в каком они находятся в металле, и были свободны от посторонних загрязнений, не содержали продуктов вторичных реакций, протекающих при растворении металла.

Электролитический метод состоит в анодном растворении образца металла в электролите, улавливании остатка неметаллических включений с последующим всесторонним их изучением.

Из электролитов наиболее широко применяют 3 %-ный водный раствор сернокислого закисного железа ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) с добавками 1 %-ного хлористого натрия (NaCl) и 0,1...0,3 % сегнетовой соли ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6$). Сегнетову соль можно заменить лимонной кислотой. Сегнетова соль и лимонная кислота образуя прочный комплекс с солями железа, устраняет возможность выпадения базовых солей железа, которые могут загрязнить осадок неметаллических включений. Вместе с тем, их добавки позволяют поддерживать почти постоянную кислотность раствора. Наличие в электролите хлористого натрия препятствует пассивированию поверхности образца и тем самым обеспечивает равномерное растворение его.

Растворение стали в данном электролите обеспечивает сохранение в неразрушенном виде включений сульфидов, закиси железа и других, неустойчивых в химическом отношении и устойчивых включений.

Полученный осадок подвергают качественному и количественному химическому анализу. Для проведения таких исследований крайне важно специальное лабораторное оборудование.

Влияние неметаллических включений на механические свойства сталей определяется не только их химическим составом, но и количеством, физическими свойствами, деформируемостью, размерами, формой и распределением. Управление этими факторами посредством технологии раскисления, внепечной обработки, разливки, согласование типа включений, определяющих свойства, с режимами обработки давлением позволяют получать требуемые значения характеристик прочности, пластичности и вязкости стали и анизотропии этих свойств. Для опре-

деления экономически оправданного уровня чистоты стали и оптимальной морфологии включений следует установить основные количественные параметры неметаллических включений, контролирующие требуемые свойства, и значения этих параметров, гарантирующие необходимый запас надежности. Важную роль в определении таких параметров неметаллических включений играет использование ААИ, статистической обработки данных, регрессионного и корреляционного анализа.

Характеристики пластичности и вязкости, низколегированных феррито-перлитных сталей во многих случаях хорошо коррелируют с суммарной протяженностью сульфидных и строчечных оксидных включений. Эффективным средством улучшения этих характеристик является модифицирующая обработка, приводящая к глобуляризации сульфидных включений.

С точки зрения современного понимания значения включений для усталостных характеристик стали чрезвычайно важно свойство включений инициировать трещины. Основной характеристикой включения как потенциального источника усталостного разрушения является его критический размер, который зависит от глубины местоположения включения под поверхностью и показателя деформируемости. Что касается влияния на сопротивление усталости, чрезвычайно вредными является включения корунда, шпинели и алюминаты кальция размером более 10 мкм, наименее же вредны, сульфиды марганца. Отрицательное влияние твердых и недеформируемых включений на усталость в значительной степени снижается, если они покрыты оболочкой из включений с высоким показателем деформируемости, таких как MnS. Критический размер включений (равный 10 мкм) является предметом обсуждений. На усталостную долговечность стали также существенно влияют плотность и распределение включений.

В настоящее время отсутствует надежная модель для предсказания относительного влияния различных типов оксидных включений на усталостные характеристики. Вместе с тем, использование такой модели, которая должна была бы включать состав включений, их размер, форму, распределение и ориентацию и, кроме того, предсказывать поля термических и механических напряжений, могло бы обеспечить большие преимущества.

4.8 Неметаллические включения характерные для стали марки 4X5МФС

Характерными неметаллическими включениями для стали марки 4X5МФС являются карбиды. Образование карбидных неметаллических включений для данной марки стали не является отрицательным моментом.

Образование карбидов в стали марки 4X5МФС позволяет достичь определенных свойств и структуры стали, позволяющих работать в установленных условиях.

С целью образования карбидов и при последующей термообработке стали для обеспечения требуемых свойств и структуры, проводят легирование металла.

Легирование является одним из основных способов воздействия на структуру и свойства стали и способствует повышению работоспособности инструмента.

						220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			66

Рассмотрим влияние легирующих элементов на свойства требуемой марки стали.

4.8.1 Влияние хрома

Хром положительно влияет на ряд характеристик штамповых сталей: прокаливаемость, склонность к вторичному твердению, теплостойкость и т.д. По мере повышения его концентрации в твердом растворе существенно возрастает устойчивость аустенита, как в перлитной, так и в промежуточной областях, качественно изменяется вид С-образных кривых.

В хромистых сталях наряду с цементитом образуется два специальных карбида: гексагональный (тригональный) Me_7C_3 и кубический $Me_{23}C_6$. Хром повышает устойчивость этих карбидов против растворения при нагреве и оказывает благоприятное влияние на чувствительность к перегреву сталей, содержащих незначительные количества вольфрама и молибдена. В комплекснолегированных сплавах хром вследствие повышения фазового наклепа при закалке и непосредственного участия в формировании упрочняющей фазы сильно усиливает эффект вторичного твердения.

Хром способствует сохранению высокого сопротивления пластической деформации при нагреве до $400-500^{\circ}C$. Пределы прочности и текучести составляют 80% от их значений при $20^{\circ}C$. Кроме того, хром повышает устойчивость против окисления при нагреве до $600-650^{\circ}C$ и против разъедающего действия ряда сред.

При снижении содержания хрома с 5 до 3% изменяется состав карбидных фаз; в стали с 3% хрома присутствуют карбиды Me_3C наряду с карбидами $Me_{23}C_6$ и Me_6C , что немного уменьшает теплостойкость и предел текучести при температурах выше $400-500^{\circ}C$.

Увеличение количества хрома с 5 до 8 % несколько повышает окалиностойкость, но снижает теплостойкость. Кроме того, из-за роста карбидной неоднородности, неизбежного с увеличением хрома, снижаются вязкость и пластичность штампов в крупных сечениях.

Наиболее заметное влияние на окалиностойкость, а следовательно, на износостойкость хром оказывает при содержании с 2,5 до 3,5-4 %.

К числу ограничений использования хрома в качестве легирующего элемента относится, прежде всего, резкое увеличение карбидной неоднородности при введении его в количествах, превышающих 4-5 %.

Следует отметить, что увеличение содержания хрома выше 5 % наряду с усилением карбидной неоднородности вызывает также повышение чувствительности к перегреву. Этот недостаток присущ сталям, легированным 1-2 % (Mo) и 0,3-0,8 % (V).

В штамповых сталях для горячего деформирования необходимо жесткое регламентирование содержания хрома, так как он ускоряет их разупрочнение, начиная с 2-3 %, что связано со значительным возрастанием скорости коалесценции карбидов.

Также хром даже при относительно невысоких концентрациях обладает зна-

чительной склонностью к дендритной ликвации, большей, чем вольфрам, марганец и кремний. Это может привести к неблагоприятным структурным изменениям - усилению карбидной полосчатости, неоднородности, отклонениям от равновесного фазового состава и др.

Учитывая вышеприведенные факторы, содержание хрома в штамповых сталях для холодного деформирования ограничивают, как правило, 3,5-4,5 %; в штамповых сталях для горячего деформирования: 4-5 % и 2-3 % Cr для сталей повышенной (4X5МФС, 4X4ВМФС) и высокой теплостойкости (типа 4X2В5ФМ, 5X3В3МФС) соответственно и 1-2 % Cr в сталях умеренной теплостойкости и повышенной вязкости.

4.8.2 Влияние молибдена

Молибден несколько повышает устойчивость против перегрева сталей, но оказывает противоположное влияние на поведение при нагреве сплавов с повышенным содержанием углерода (~ 1%).

Молибден эффективно повышает теплостойкость и задерживает коагуляцию карбидов, выделяющихся по границам зерен и некоторым кристаллографическим плоскостям, и усиливают дисперсионное твердение при отпуске, но при увеличении их содержания ухудшается вязкость.

В сталях с молибденом дисперсионное твердение наступает при более низких температурах отпуска, несколько сильнее повышается вторичная твердость. Выделяющийся карбид обладает большей способностью к коагуляции, вследствие чего, молибденовая сталь в сравнении с вольфрамовой имеет лучшую вязкость, но несколько меньшую теплостойкость. Также молибден подавляет склонность к отпускной хрупкости вследствие благоприятного воздействия на состояние границ зерен. Содержание молибдена, несмотря на его эффективное влияние, устанавливают не выше 2,5-2,8 %, так как он усиливает обезуглероживание.

Стали, в которых молибден заменяет более 2-3 % имеют меньшую карбидную неоднородность. Молибден при замене 3-4 % (и одинаковом ванадии) почти не изменяет теплостойкости, вследствие чего, прочностные свойства вольфрамомолибденовых сталей при нагреве такие же, как вольфрамовых. Выбор конкретный соотношений между вольфрамом и молибденом определяется условиями эксплуатации инструмента, и он должен быть экономически обоснован.

4.8.3 Влияние ванадия

Ванадий оказывает эффективное влияние на процессы собирательной рекристаллизации и существенно уменьшает чувствительность штамповых сталей к перегреву. Его действие оказывается заметным уже при содержании порядка 0,10-0,30 %. Для других групп сталей, содержащих карбиды типа M_7C_3 , $M_6C_2M_{23}C_6$, требуется большее количество ванадия для существенного смещения температур начала интенсивного роста зерна.

На механические свойства ванадий оказывает неоднозначное влияние. Уменьшая чувствительность к перегреву, при содержаниях до 1% он может по-

вышать прочность и пластичность высокоуглеродистых и среднеуглеродистых (~ 0,4% С) штамповых сталей.

Положительное влияние ванадия на сопротивление хрупкому разрушению после отпуска при 150-350 °С сохраняется также при легировании до 2-4 % (V). После обработки на первичную твердость (60-62 HRC) такие стали имеют прочность при изгибе и ударную вязкость около 300-350 и 5-8 кгс/см² против 230-270 и 2-4 кгс/см², для аналогичных сплавов, но с 0,5-1 % (V). При высокотемпературном (>500 °С) отпуске ванадий при повышенных его содержаниях действует в противоположном направлении, т.е. уменьшает пластичность штамповых сталей, как горячего, так и холодного деформирования. Наряду с увеличением опасности преждевременного хрупкого разрушения снижение пластичности высокованадиевых сталей после обработки на вторичную, твердость может приводить также к уменьшению износостойкости в условиях динамического нагружения из-за скалывания и микровыкрашивания.

Увеличение содержания ванадия с 0,4 до 0,8 % усиливает дисперсионное твердение и улучшает теплостойкость, но снижает вязкость. Вследствие интенсивного развития дисперсионного твердения, наступающего при увеличении количества ванадия с 0,35 до 1 %, вязкость снижается с 2,3-2,5 до 1,6-1,8 кг/см² при 20° С и с 3,8-4,0 до 3-3,5 кг/см² при 650°С. Рекомендуется стали с 0,5 % V (4X5MC) применять для работы при нагреве до 580-590 °С, а с 1% (V) (4X5B2ФС и типа 4X5MФС) - при нагреве до 640-650 °С.

Ванадий, также как и хром, обладает сильно выраженной склонностью к дендритной ликвации, но в отличие от него ванадий благоприятно влияет на дисперсность и характер распределения первичных карбидов в высокоуглеродистых сталях.

При введении в состав сталей 3-4 % (V) наблюдается значительное ухудшение шлифуемости (из-за присутствия очень твердого карбида MeC), что ограничивает их широкое применение. Другим недостатком является пониженная окалиностойкость при отжиге и горячей пластической деформации.

4.8.4 Влияние кремния

Кремний является ферритообразующим элементом и «выклинивает» область существования α -железа в сплавах системы Fe - Si уже при содержании около 2 %. Аналогично влияет он на диаграмму состояния углеродистых сталей (0,5-1 % С), однако, в этом случае полное завершения α - γ -превращения достигается при содержаниях 3-5 % кремния.

Не образуя в сплавах на основе железа соединений с углеродом, кремний практически не оказывает влияния на тип и состав карбидов в штамповых сталях, но вызывает их укрупнение в отожженном состоянии.

Кремний интенсифицирует процессы карбидообразования при отпуске и значительно повышает уровень вторичной твердости. В комплекснолегированных штамповых сталях введение этих элементов вызывает прирост упрочнения, не сопровождающийся существенным обеднением твердого раствора легирующими

										Лист
										69
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР					

элементами, и обусловленный в основном повышением дисперсности выделяющихся при старении карбидов. Однако кремний, смещающий в сторону более низких температур отпуска «пик» вторичной твердости (при содержаниях >1,5 %) увеличивают скорость разупрочнения при высоком (620-650 °С) нагреве. В связи с этим содержание кремния в штамповых сталях для горячего деформирования ограничивают 0,5-0,8 %.

Кремний влияет аналогично хрому на механические свойства стали и стойкость к окислению. Необходимо отметить, что ограничения, связанные с отрицательным влиянием рассматриваемых элементов на теплостойкость, практически снимаются для штамповых сталей холодного деформирования, которые нагреваются при эксплуатации не выше 350-450 °С. Исследования показали, что легирование кремнием и кобальтом сталей в количествах до 3-4 и 5 % соответственно позволяет значительно повысить вторичную твердость (до 64-67 HRC), а также сопротивление малым пластическим деформациям. Однако повышая указанные свойства данные элементы, снижают ударную вязкость и прочность при изгибе.

4.8.5 Влияние марганца

Легирование сталей марганцем повышает прокаливаемость. Этим определяется целесообразность легирования ими штамповых сталей, предназначенных для изготовления крупногабаритных инструментов. Мало изменяя чувствительность к перегреву и, как следствие, оптимальные температуры закалки, никель и марганец сильно понижают критическую скорость охлаждения.

Применяется легирование штамповых сталей повышенной прокаливаемости и вязкости для горячего деформирования никелем и марганцем в количествах 0,5-1 %.

Марганец увеличивает количество остаточного аустенита, но не предотвращают его распад под воздействием циклически изменяющихся напряжений при эксплуатации штампов. Это делает недопустимым легирование данными элементами вторичнотвердеющих штамповых сталей с высоким сопротивлением смятию.

В общем случае для инструментальных сталей содержание марганца не должно превышать 0,4 %.

В таблице 21 отображено образование карбидов при различных режимах термообработки их структурные составляющие.

Таблица 21 - Образование карбидов при проведении термической обработки

					220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		70

Структурные составляющие: карбиды, перлит

Отжиг на зернистый перлит. Твердость 230 HV.

Продольный шлиф. Темные полосы в середине микрофотографии отличаются от окружающей структуры, так как содержат множество карбидов.

Увеличение: ×500

Структурные составляющие: карбиды, перлит

Отжиг на зернистый перлит. Твердость 230 HV.

Мелкие неравномерно распределенные карбиды. По их виду можно заключить, что бейнит присутствовал до отжига на зернистый перлит. Более крупные карбидные частицы располагаются по границам первичного аустенитного зерна

Увеличение: ×1500

Структурные составляющие: мартенсит

Термообработка: 1030° С в течение 15 мин, 730 °С в течение 400 с, охлаждение в воде. Твердость 740 HV.

Мартенсит. Четко выявляются границы первичного аустенитного зерна. Часто на них образуются более крупные мартенситные иглы.

Увеличение: ×500

Структурные составляющие: карбиды, перлит, эвтектоид

Термообработка: 1030 °С в течение 15 мин, 730 °С в течение 2700 сек, охлаждение в воде.

После выделения избыточных карбидов образуется крупнопластинчатый перлит, затем появляется эвтектоид с очень мелкими карбидами ванадия (светлые области на микрофотографии).

Увеличение: ×500

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР

Лист

71

Структурные составляющие: карбиды, перлит

Термообработка: 1030 °С в течение 15 мин, 730 °С в течение 6000 с, охлаждение в воде. Твердость 413 HV.

Вследствие длительной выдержки после завершения превращения карбиды перлита частично сфероидизировались. В светлых областях присутствуют карбиды ванадия, которые не разрушаются.

Увеличение: ×1500

Структурные составляющие: мартенсит, перлит

Термообработка: 1030 °С в течение 15 мин, 660 °С в течение 17 000 с (-5 ч), охлаждение в воде. Твердость 478 HV

При 660 °С превращение протекает настолько медленно, что перлит образуется только по границам зерен аустенита. Светлая часть микроструктуры - мартенсит.

Увеличение: ×500

Структурные составляющие: аустенит, бейнит, мартенсит

Термообработка: 1030 °С в течение 15 мин, 300 °С в течение 19 000 с (~5 ч), охлаждение в воде. Твердость 583 HV

Частичное превращение в игольчатый бейнит. Остальная структура представляет собой аустенит и мартенсит (светлые участки), детали которых неразличимы, если микрошлиф протравлен для выявления бейнита.

Увеличение: ×1500

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР

Лист

72

Структурные составляющие: карбиды, перлит

Термообработка: 1030 °С в течение 15 мин, охлаждение в течение 150 000 с (-42 ч) до 500 °С. Твердость 222 HV.

Преимущественно перлит и зернограничные карбиды. В светлых участках содержатся отдельные грубые карбиды.

Увеличение: ×500

Структурные составляющие: карбиды, перлит

Термообработка: 1030 °С в течение 15 мин, охлаждение в течение 45 000 с (-12 ч) до 500 °С. Твердость 227 HV.

Тонконластинчатый перлит, границы первичного зерна аустенита содержат выделения карбидов. В светлых областях карбиды зернистые, а в темных - пластинчатые.

Увеличение: ×500

Структурные составляющие: бейнит, мартенсит, перлит

Термообработка: 1030 °С в течение 15 мин, охлаждение в течение 11 600 с (-3 ч) до 500 °С. Твердость 625 HV.

Вслед за образованием небольшого количества перлита (темные участки) возникает грубый, а затем тонкоигольчатый бейнит и, наконец, мартенсит.

Увеличение: ×500

Структурные составляющие: карбиды, мартенсит

Термообработка: 1030 °С в течение 15 мин, охлаждение в масле. Диаметр образца 30 мм, толщина 10 мм. Твердость 717 HV.

Продольный шлиф. Полосчатая структура из темного и светлого мартенсита. В светлых полосах много карбидов.

Увеличение: ×100

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР

Лист

73

Структурные составляющие: карбиды, мартенсит

Термообработка: 1030 °С в течение 15 мин, охлаждение в масле; 550 °С в течение 2 ч, охлаждение на воздухе. Диаметр образца 30 мм, толщина 10 мм. Твердость 588 НV.

Улучшенная структура. Еще различимы исходные мартенситные иглы. Только относительно крупные карбидные выделения выявляются как стержни или пластины. Границы первичных зерен аустенита определяются по темным крупным карбидным выделениям (левая сторона микрофотографии).

Увеличение: ×1500

Структурные составляющие: карбиды, мартенсит

Термообработка: 1030 °С в течение 15 мин, охлаждение в масле; 650 °С в течение 2 ч, охлаждение на воздухе. Диаметр образца 30 мм, толщина 10 мм. Твердость 353 НV.

Улучшенная структура. Содержит множество карбидных частиц. Частично эти выделения располагаются рядами. С правой стороны микрофотографии - крупные карбиды, которые не растворились в процессе аустенизации

Увеличение: ×1500

В выпускной квалификационной работе на примере стали марки 4X5MΦC разработана технология выплавки и внепечной обработки стали с применением агрегата печь-ковш.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы рассмотрены вопросы:

1. Состояние рынка потребления инструментальных марок сталей, в том числе стали марки 4X5МФС.

2. Современные способы производства стали марки 4X5МФС с последующим расчетом материального баланса плавки для электродуговой печи номинальной садкой 10 тонн с внепечной обработкой стали, разработана технология выплавки и внепечной обработки стали с применением агрегата печь-ковш в условиях ООО «ЗМЗ».

3. Мероприятия по оптимизации технологических режимов.

4. Проанализированы условия образования неметаллических включений, их влияние на механические свойства стали данной марки и способы удаления.

					220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		75

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Позняк, Л.А., Скрынченко, С.И. Штамповые стали / Л.А. Позняк, С. И. Скрынченко. – М.: Металлургия, 1980. – 244 с.

2 Кудрин В.А. Теория и технология производства стали: Учебник для вузов/ В.А. Кудрин. – М.: «Мир», ООО «Издательство АСТ», 2003. – 528 с.

3 Дюдюкин Д.А. Производство стали Том 3. Внепечная металлургия стали/ Д.А. Дюдюкин, В.В. Кисиленко. – М.: «Теплотехник», 2010. – 544 с.

4 Гудим Ю.А. Производство стали в дуговых печах. Конструкции, технология, материалы: монография/ Ю.А. Гудим, И.Ю. Зинуров, А.Д. Киселев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 547с.

5 Поволоцкий Д.Я. Электрометаллургия стали и ферросплавов: учебник для вузов / Д.Я. Поволоцкий, В.Е. Рошин, Н.В. Мальков. – 3-е изд., перераб. И доп. – М.: Металлургия, 1995. – 592 с.

6 Винокур, Б.Б. Структура конструкционной легированной стали: учебник для ВУЗов / Б.Б. Винокур, В.Л. Пилюшенко, О.Г. Касаткин. – М.: Металлургия, 1983. – 73с.

7 Дукмасов, В.Г. Состояние и развитие технологий и оборудования в мировой черной металлургии: справочник / В.Г. Дукмасов, Л.М. Агеев. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2002. – 99 с.

8 Смирнов А.Н. Современные тенденции развития процессов производства и разлива стали.// «Металл и литье Украины» №1, 2006.С. – 7-10

9 Ицкович Г.М. Раскисление стали и модифицирование неметаллических включений/ Г.М. Ицкович. – М.: Металлургия, 1981. – 296 с.

10 Брик С.Д. Черная металлургия: Бюл. ин-та "Черметинформация". 1980. Вып. 12/872. С. 9 – 25.

11 ОАО «Златоустовский металлургический завод»/ТИ 01–Э–2005, – Златоуст, 2005. – 62 с.

					220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		76

12 Влияние неметаллических включений на механические свойства сталей/ А.В. Нархов, Б.А. Клыпин, А.Рей и др./ Ин-т "Черметинформация". М., 1992 (Обзор. информ. Сер. Металловедение и термическая обработка. Вып.1. – 22 с.

13 Бутов А.М. Рынок продукции станкостроения 2020 . – 19с.

14 Курдюмов Г. К., Утевский Л. М., Энтин Р. И. Превращения в железе и ста- ли. Наука,1977. – 236 с.

15 Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. Издательство :Металлургия, 1978. – 392 с.

16 Богачев И. Н. Пермяков В. Г. Отпуск закаленной стали.М.: Машгиз, – 1950. – 120 с.

17 Белоус М.В., Черепин В.Т., Васильев М.А. Превращения при отпуске стали. М.-Свердловск.:Металлургия,1973. – 232с

18 Стародубов К.Ф. Процессы, происходящие при отпуске стали. Изд. ВЦСПС, ПРОФИЗДАТ, 1960. – 32с.

19 Дейнеко Л.Н.Исследование процессов структурообразования при упроч- няющей термической обработке трубных сталей. Сб.трудов межд.н.-практ. конф. «Химия в строительных материалах и материаловедение в XXI веке», том 2, Шымкент, 2008. – С.60 – 67

20 Электронный ресурс / <http://tverdyslav.ru> (дата обращения 28.02.2021 г.)

21 Марочник стали и сплавов/ электронный ресурс/ <http://splav-kharkov.com> (дата обращения 28.02.2021 г.)

22«Рынок кузнечно-прессового оборудования». Электронный ре- сурс/<http://www.ito-news.ru/> (дата обращения 03.03.2021 г.)

23 Инструментально штамповая сталь. Техмаш холдинг. Электронный ре- сурс/<https://pellete.ru/> (дата обращения 03.03.2021 г.)

24 «Минпромторг России». Электронный ресурс /<https://minpromtorg.gov.ru/> (дата обращения 03.03.2021 г.)

25 «Использование нанотехнологий для создания высокоэффективного обра- батывающего инструмента»: журнал, Электронный ресурс/ <https://www.rusnano.com/> (дата обращения 03.03.2021 г.)

26 «Металлургический комплекс РФ» <https://lektiv.org/12-51760.html> (дата об- ращения 03.03.2021 г.)

27 Современные технологии и мировые тенденции в металлургии. <https://metinvestholding.com> (дата обращения 03.03.2021 г.)

28 Изучение рынков сырья, металлов и продукции из них. International Metal- lurgical Research Group. //www.metalresearch.ru// (дата обращения 03.03.2021 г.)

					Лист
					77
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР