

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 4X5МФС»

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					

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 чугуновых 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 4Х5МФС 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 температурой ковки 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 4Х5МФС

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 4Х5МФС

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 4Х5МФС 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.

										Лист
										7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР					

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.

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:

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

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

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

									Лист
									20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР				

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

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

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

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.

										Лист
										22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР					

- 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

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

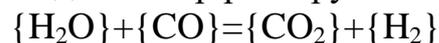
$$V_{\text{влаж.в}} = V_{\text{в}} \cdot \frac{273 + t_{\text{в}}}{273} \cdot \frac{p_{\text{в}}}{p_{\text{в}} - E \cdot f} \quad (7)$$

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

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 4Х5МФС (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.

										Лист
										27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР					

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 плавления 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					

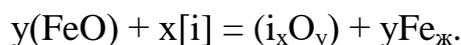
Для определения расхода технического кислорода в окислительный период составляем баланс кислорода, кг:

- 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.

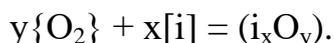
(FeO) внесет $(39,163 + 2,852 + 42,212 + 0,234) \times \frac{30}{100} = 25,338$ кг кислорода, а газообразный кислород внесет $131,817 - 25,338 = 106,479$ кг кислорода.

(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					

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 $\frac{12,5 \times 30}{45} = 8,3$ 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 $\frac{202 \times 2 \times 30}{100 \times 100} = 1,212$ кг алюминия.

Это количество алюминия свяжет кислорода $\frac{1,212 \times 48}{54} = 1,077$ кг. При этом образуется и перейдет в шлак: $\frac{1,077 \times 102}{54} = 2,034$ кг Al_2O_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

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

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

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

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

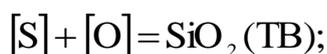
Как и зарождение пузырька, процесс раскисления может протекать лишь в случае, когда $G_2 < G_1$. При этом знак изменения ΔG зависит от величины r , так как при малых ее значениях $r^3 < r^2$, а при больших $r^3 > r^2$. Соответственно, при малых r с его увеличением ΔG возрастает, а при малых величинах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

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				

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					

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-

										Лист
										62
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР					

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°C. Пределы прочности и текучести составляют 80% от их значений при 20°C. Кроме того, хром повышает устойчивость против окисления при нагреве до 600-650°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°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-

										Лист
										67
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	220302.2021.307.00.00 ПЗ ВКР					

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					

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 HV.

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 HV.

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 4X5MΦС 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

