

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»  
Филиал ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» 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 технологии выплавки, внепечной обработки и разливки сплава  
38Х2МЮА  
ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

ЮУрГУ - 22.03.02.306.00.00 ПЗ ВКР

Руководитель проекта

\_\_\_\_\_ доц., к.т.н. А.В. Рябов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Автор проекта студент группы  
ФТТ-534

\_\_\_\_\_ А.С. Воронина

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Технический контроль

\_\_\_\_\_ доц., к.т.н. А.В. Рябов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г

Нормоконтроль

\_\_\_\_\_ инженер, В.В.Седухин

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1 ОСОБЕННОСТИ СТАЛИ МАРКИ 38Х2МЮА – Ш.....	9
2 ТРЕБОВАНИЯ К МЕТАЛЛУ ОТКРЫТОЙ ВЫПЛАКИ СТАЛИ 38Х2МЮА-Ш .....	19
3 ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ, ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ И РАЗЛИВКИ СТАЛИ МАРКИ 38Х2МЮА – Ш .....	21
3.1 Технологическая цепочка производства стали марки 38Х2МЮА – Ш ..	21
3.2 Метод выплавки.....	23
3.3 Подготовка шихтовых материалов и их завалка.....	24
3.4. Период плавления.....	27
3.5. Окислительный период.....	29
3.6. Восстановительный период.....	30
3.7 Порядок введения раскислителей и легирующих.....	32
3.8 Выпуск плавки .....	33
4 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА СТАЛИ МАРКИ 38Х2МЮА - Ш .....	36
4.1 Требования к исходным материалам, применяемых при электрошлаковом переплаве .....	36
4.2 Требования к расходным электродам .....	36
4.3 Требования к флюсам.....	37
4.4 Подготовка установки ЭШП к переплаву.....	37
4.5 Проведение процесса электрошлакового переплава .....	38
4.6 Охлаждение слитков .....	40
4.7 Техника безопасности .....	41
5 ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И РАСЧЁТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТАЛИ МАРКИ 38Х2МЮА - Ш.....	42
5.1 Геометрический расчёт плавильного пространства .....	42
5.2 Тепловой расчёт плавки.....	47
5.3 Электрический расчёт плавки.....	53
5.4 Материальный баланс плавки .....	60
6 ТРЕБОВАНИЯ К ДАЛЬНЕЙШЕМУ ПЕРЕДЕЛУ.....	67
7 СПЕЦИАЛЬНАЯ ЧАСТЬ .....	68
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	76
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	77

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время без металла высокого качества технический прогресс не возможен. Развитие новых отраслей техники – скоростной авиации и ракетной техники, атомной энергетики, радиоэлектроники и приборостроения – вызвало необходимость разработки новых способов производства стали, позволяющих получать металл, обладающий высокой жаропрочностью, долговечностью, контактной выносливостью, технологической пластичностью. Такими способами являются электрошлаковый, вакуумный дуговой, плазменный и электронно-лучевой переплав расходуемых электродов и водоохлаждаемых кристаллизаторах, выплавка стали в вакуумных индукционных печах.

Металл, подвергшийся электрошлаковому переплаву, отличается высокой чистотой по неметаллическим включениям, свободен от различного рода литейных дефектов ликвационного и усадочного происхождения, обладает высокой физической однородностью и чрезвычайно высокой плотностью структуры [1]. Электрошлаковый переплав является достаточно гибким процессом, так как, меняя сечение расходуемого электрода, состав применяемого флюса и его количества, а также электрические параметры процесса, удается довольно в широких пределах регулировать скорость плавки. Кроме того, при электрошлаковом процессе имеется возможность получения слитков разнообразного сечения (круглого, квадратного, прямоугольного с большим соотношением длин широкой и узкой сторон). Методом электрошлакового переплава можно получить отливки самой различной формой (полые заготовки, заготовки прокатных валков, сосудов высокого давления, крупной запорной арматуры высокого давления, заготовки коленчатых валов и шатунов судовых двигателей и некоторые другие изделия). Специальные способы производства сталей и сплавов требуют существенных дополнительных затрат по сравнению с обычными высокопроизводительными методами выплавки. Эти затраты можно считать оправданными в случае

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		7

получения металла с улучшенными потребительскими свойствами или нового материала, который не удастся получить традиционными методами. Основные преимущества электрошлакового переплава перед другими способами получения слитка методом переплава: простота его обслуживания; возможность управления направлением и скоростью кристаллизации слитка; отсутствие усадочной раковины и пористости; обеспечение такого качества поверхности, которое исключает необходимость в зачистке при горячей обработке; разнообразная геометрия электродов и кристаллизаторов позволяет получать слитки разнообразного сечения, фасонные отливки и полые изделия; хорошая рафинирующая способность процесса от неметаллических включений; возможность корректировки химического состава металла путем применения соответствующего флюса; повышение плотности металла; улучшение коррозионной стойкости металла; повышение однородности структуры и химического состава; общее улучшение характеристик пластичности и вязкости металла; возможность управления направлением и скоростью кристаллизации слитка; отсутствие усадочной раковины и пористости; обеспечение такого качества поверхности, которое исключает необходимость в зачистке при горячей обработке; разнообразная геометрия электродов и кристаллизаторов позволяет получать слитки разнообразного сечения, фасонные отливки и полые изделия; хорошая рафинирующая способность процесса от неметаллических включений; возможность корректировки химического состава; общее улучшение характеристик пластичности и вязкости металла; возможность управления направлением и скоростью кристаллизации. В данном проекте будет разработана технология производства стали 38Х2МЮА - Ш.

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		8

## 1 ОСОБЕННОСТИ СТАЛИ МАРКИ 38Х2МЮА - Ш

В таблице 1 представлен химический состав стали 38Х2МЮА - Ш.

Таблица 1– Химический состав стали 38Х2МЮА (ГОСТ 4543-2016)

В процентах

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu
0,35	0,20	0,30	н.б.	н.б.	1,35	н.б.	0,15	0,70	до
0,42	0,45	0,60	0,025	0,025	1,65	0,30	0,25	1,10	0,30

Сталь 38Х2МЮА релаксационнотойкая, жаропрочная, доэвтектоидная.

Назначение стали 38Х2МЮА релаксационнотойкая жаропрочная хромоалюминиевая с молибденом сталь 38Х2МЮА используется для изготовления азотируемых деталей, работающих при температурах до 450 °С – валы, шестерни, втулки, пальцы, плунжеры, другие изделия. Сталь 38Х2МЮА-Ш теплоустойчива до 500 °С, склонна к обезуглероживанию. Для повышения прочности сердцевины перед азотированием проводится улучшение, допускается замена «нормализация + отпуск». Чтобы снизить деформацию при азотировании, перед операцией детали подвергают стабилизирующему отпуску  $t = 620 - 650$  °С с охлаждением в печи до 400 °С, далее на воздухе. После азотирования материал приобретает устойчивость к коррозии.

Отечественные аналоги заменители стали 38Х2МЮА-Ш:

- 20Х3МВФ;
- 38ХВФЮ;
- 38Х2Ю;
- 38Х2ЮА.

В таблице 2 представлены характеристики стали 38Х2МЮА-Ш

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР				Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата					9

Таблица 2 – Характеристики стали 38Х2МЮА-Ш

Марка	Классификация	Вид поставки	ГОСТ	Зарубежные аналоги
38Х2МЮА	Сталь жаропрочная релаксационностойкая	Сортовой прокат	4543–16	есть
		Поковки	8479–70	

В таблице 3 представлены технологические особенности марки 38Х2МЮА – Ш

Таблица 3 – Технологические особенности стали марки 38Х2МЮА-Ш

Вид	t, °С	Охлаждение	
		Размер сечения, мм	Условия
Слиток	1240–800	до 50	На воздухе в штабелях
		51–100	В ящиках
		101–700	Низкотемпературный отжиг
			Переохлаждение
Заготовка	1240–800	до 50	На воздухе в штабелях
		51–100	В ящиках

Сталь 38Х2МЮА-Ш не применяется для сварных конструкций, флокеночувствительная.

К отпускной хрупкости сталь 38Х2МЮА не склонна.

В таблице 4 представлены механические свойства стали 38Х2МЮА-Ш.

Таблица 4 – Механические свойства стали марки 38Х2МЮА–Ш

В процентах

Сортамент	ГОСТ	Размеры – толщина, диаметр мм	Режим термообработки	КСУ кДж/м <sup>2</sup>	Ψ	δ	σ <sub>т</sub> , МПа	σ <sub>в</sub> , МПа
Пруток	4543-16	30	Закалка	Не	Не	Не	Не	Не
			Отпуск	менее 880	менее 50	менее 14	менее 835	менее 980

В таблице 5 представлена твердость, МПа стали 38Х2МЮА-Ш

Таблица 5 – Твердость стали марки 38Х2МЮА-Ш

Сортамент	ГОСТ	Термообработка	НВ 10 <sup>-1</sup>
Прокат	4543–71	Отжиг	229
нагартован.		-	255

В таблице 6 представлена температура критических точек стали 38Х2МЮА-Ш

Таблица 6 - Температура критических точек стали марки 38Х2МЮА–Ш

Критические точки	Ас <sub>1</sub>	Ас <sub>3</sub>	Аг <sub>1</sub>
Температура	800 °С	940 °С	730 °С

В таблице 7 представлен предел выносливости стали 38Х2МЮА-Ш

Таблица 7 – Предел выносливости стали марки 38Х2МЮА-Ш

Термообработка		N	S <sub>-1</sub>
Режим	t, °C		МПа
Закалка (масло)	940	10 <sup>7</sup>	441–470
Отпуск	640		
Закалка (масло)	940	-	608–617
Отпуск (48ч)	500		

В таблице 8 представлены физические свойства стали 38Х2МЮА-Ш

Таблица 8 – Физические свойства стали марки 38Х2МЮА-Ш

t	γ	E 10 <sup>-5</sup>	l	α 10 <sup>6</sup>	C
°C	кг/м <sup>3</sup>	МПа	Вт/(м·град)	1/Град	Дж/ (кг·град)
20	7710	2,09	33	-	-
100	-	2,02	33	11,5	496
200	-	1,94	32	11,8	517
300	-	1,90	31	12,7	533
400	-	1,81	20	13,4	546
500	-	1,74	20	13,9	575
600	-	1,62	28	14,7	609
700	-	1,47	27	14,9	638
800	-	1,37	27	-	676

В таблице 9 представлены, точные и ближайшие зарубежные аналоги стали марки 38Х2МЮА-Ш



Таблица 9 – Зарубежные аналоги стали марки 38X2MЮА-Ш

Англия	Германия	Евросоюз	Испания	Италия	Китай
BS	DIN, WNr	EN	UNE	UNI	GB
905M39	1.8509 41CrAlMo7	41CrAlMo7	F.174	41CrAiMo7	38CrMoAl

Макроструктура металлопродукции, произведенной из слитка, при проверке на протравленных темплетях или в изломе не должна иметь остатков усадочной раковины подусадочной рыхлоты, подкорковых пузырей, трещин (кроме дефектов поверхности проб), расслоений, корочек, инородных металлических и шлаковых включений, флокенов.

Нормируемые в баллах требования к макроструктуре металлопродукции, произведенной из слитка, диаметром или толщиной 40 мм и более должны соответствовать указанным в таблице 10.

Таблица 10 - Макроструктура металлопродукции диаметром или толщиной 40 мм и более, произведенной из слитка

В баллах

Класс стали	Макроструктура металлопродукции.					
	Центральная пористость	Точечная неоднородность	Ликвационный квадрат	Общая пятнистая ликвация	Краевая пятнистая ликвация	Подусадочная ликвация
Качественная	3	3	3	1	1	1
Высококачественная	2	2	2	не допускаются		1
Особовысококачественная	1	1	1	не допускаются		

В металлопродукции из высококачественной стали марок 20ХГСА,

25ХГСА, 30ХГСА и 35ХГСА допускается ликвационный квадрат не более 3 балла, в металлопродукции из высококачественной стали марки 38Х2МЮА-Ш краевая и общая пятнистая ликвация не более 2 балла.

В металлопродукции из особовысококачественной стали допускается послойная кристаллизация и светлая полоса (контур) не более 3 балла.

В металлопродукции с качеством поверхности группы ЗГП допускаются подкорковые пузыри на глубину не более половины суммы предельных отклонений на диаметр или толщину.

Макроструктура металлопродукции, произведенной из непрерывно-литой заготовки, не должна иметь трещин, расслоений, корочек, инородных металлических и шлаковых включений, флокенов.

Нормируемые в баллах требования к макроструктуре металлопродукции, произведенной из непрерывно литой заготовки, диаметром или толщиной 40 мм и более должны соответствовать указанным в таблице 11.

Таблица 11 - Макроструктура металлопродукции диаметром или толщиной 40 мм и более, произведенной из непрерывно литой заготовки

В баллах

Класс стали	Макроструктура металлопродукции				
	Центральная пористость	Подусадочная ликвация	Ликвационные полосы	Краевые точечные загрязнения	Светлая полоса (контур)
Качественная	3	2	1	1	1
Высококачественная	2	2	1	1	не допускается
Особовысококачественная	1	2	не допускаются		

Правила приемки

Общие правила приемки по ГОСТ 7566-2018.

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		14

Металлопродукцию принимают партиями, состоящими из стали одной марки, одной плавки, одного размера по сечению и одного режима термической обработки (при изготовлении в термически обработанном состоянии).

Каждую партию металлопродукции сопровождают документом о качестве, оформленным по ГОСТ 7566-2018 или стандарту. В документе о качестве дополнительно указывают:

- способ выплавки стали (по требованию заказчика);
- способ разливки стали (по требованию заказчика);
- наличие внепечной обработки для кислородно-конвертерной стали;
- массовую долю алюминия при его введении в сталь, если массовую долю азота не нормируют и не контролируют;
- массовую долю азотсвязывающих элементов (титан, ванадий, ниобий) при их введении в сталь, если массовую долю азота не нормируют и не контролируют;
- фактическую массовую долю, периодически контролируемых остаточных химических элементов при проведении контроля, а в промежутках между контролем — слова: «В соответствии с ГОСТ 4543-2016»;
- состояние поставки (по требованию заказчика - вид термической обработки).

Для контроля качества от партии металлопродукции отбирают:

- а) для химического анализа - пробы по ГОСТ 7565-81. Контроль остаточных элементов - меди, никеля, хрома, азота, вольфрама, ванадия, молибдена и титана проводят периодически не реже одного раза в квартал;
- б) для контроля качества поверхности, концов и торцов - все прутки, полосы и мотки;
- в) для контроля размеров и отклонений формы - 10 % прутков, полос и мотков, но не менее 5 шт.;
- г) для испытания на осадку и определения глубины обезуглероженного слоя - по три прутка, полосы или мотка;

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		15

д) для контроля твердости - 2 % прутков, мотков или полос размером более 30 мм и по одному прутку, одной полосе или одному мотку - от каждой 1 т прутков, полос или мотков размером 30 мм и менее. При этом должно быть отобрано не менее пяти прутков, полос или мотков:

е) для испытания на растяжение и ударный изгиб - по два прутка, полосы или мотка:

ж) для контроля макроструктуры по излому и/или травлением - по два прутка, полосы или мотка;

и) для определения прокаливаемости и величины аустенитного зерна - по одному прутку, полосе или мотку от плавки-ковша для стали всех марок, за исключением борсодержащих, и по два прутка, полосы или мотка от плавки-ковша - для стали марок, содержащих бор;

к) для контроля загрязненности стали неметаллическими включениями - в соответствии с ГОСТ 1778-70.

При получении неудовлетворительных результатов испытаний хотя бы по одному показателю при выборочном контроле по нему проводят повторные испытания на удвоенном количестве проб, отобранных от единиц металлопродукции, из числа не проходивших испытания.

При получении удовлетворительных результатов при повторных испытаниях при выборочном контроле все единицы металлопродукции, входящие в партию, считают годными, за исключением единиц металлопродукции, не выдержавших первичные испытания.

При получении неудовлетворительных результатов при повторных испытаниях при выборочном контроле допускается изготовителю проводить сплошной контроль по показателям с выборочным контролем, по которым эти испытания не выдержаны, или подвергать металлопродукцию повторной термической обработке (если таковая проводилась) и предъявлять партию к испытаниям вновь.

При получении неудовлетворительных результатов анализа ковшовой

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		16

пробы химический состав стали может быть аттестован по анализу готовой металлопродукции. При этом в документе о качестве в строке результатов химического анализа дополнительно указывают фразу: «В готовой металлопродукции».

Сталь 38Х2МЮА–Ш обладает рядом особенностей:

- относится к сложнолегированным конструкционным сталям и обрабатывается на высокую прочность;
- наряду с высоким уровнем прочности требуется доработки состава для получения большей пластичности и высокой точности в размерах;
- для улучшения физических свойств лучше использовать высокотемпературную термомеханическую обработку;
- по классификации относится к жаропрочны релаксационнстойким сталям. Для улучшения качественных технических параметров применяют обработку под действием высоких температур. В данном процессе совмещают пластическую деформацию и быструю закалку.

Более детально сталь данного типа используется для создания:

- штоков клапанов турбин парового типа, функционирующих при температурном режиме до 450 °С;
- гильз цилиндров в двигателях внутреннего сгорания;
- игл форсунок, тарелок бус, распылителей;
- элементов ракетных и авиационных двигателей;
- частей трубопроводов с закалкой в масле или водяном растворе;
- азотируемых деталей авиастроения;
- цельнокатаных колец различного использования.

По способам свариваемости используют несколько вариантов:

- без ограничений, когда плавление происходит без подогрева и без окончательной обработки;
- ограниченно – свариваема: процесс термообработки осуществляется в режиме от 100 до 120 °С;

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		17

– трудносвариваемая для получения сварных соединений высокого качества, потребуется подогрев до 200 – 300 °С при сварке, а затем отжиг.

Сталь 38Х2МЮА–Ш не склонна к отпускной способности.

Азотирование для данного типа стали производят с целью улучшения качественных характеристик центральной части. Так же материалов с маркировкой 38Х2МЮА поддается обезуглероживанию и теплоустойчив до 500 °С. Взамен азотирования возможно производить нормализацию при температурах от 930 - 950 градусов, а так же, отпуск от 600 - 650 градусов. Чтобы уменьшить деформацию при азотировании, детали перед окончательной шлифовкой лучше подвергнуть стабилизирующему отпуску при температуре 630 - 650 градусов с последующим охлаждением в печи до 400 градусов, а затем вынести на воздух. После всех этапов азотирования, материал из стали 38Х2МЮА - Ш получает высокие антикоррозийные свойства, позволяющие находится в атмосферных условиях, жидкости, водяных парах.

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		18

## 2 ТРЕБОВАНИЯ К МЕТАЛЛУ ОТКРЫТОЙ ВЫПЛАКИ СТАЛИ 38Х2МЮА-Ш

При производстве сталей и сплавов большие трудности встречаются в процессе их выплавки. Легированные стали выплавляют главным образом в дуговых или индукционных электропечах. Во время плавки металл загрязняется материалом огнеупорной футеровки печи и продуктами раскисления, что ведёт к повышенному содержанию неметаллических включений. Кроме того, металл насыщается газами. Неизбежно дальнейшее загрязнение металла и при разливке на воздухе.

Для большинства легированных сталей и сплавов характерен высокий коэффициент усадки, что обуславливает образование в слитке большой усадочной раковины.

Характерной особенностью этих материалов является также склонность к транскристаллизации. Неметаллические включения и газы концентрируются на поверхностях столбчатых кристаллов. В результате этого спайность соседних кристаллов ослабляется, и в процессе горячей механической обработки металл может разрушиться.

Отличительной особенностью многих легированных сталей и сплавов является наличие в слитке осевых дефектов в виде пористости и кристаллизационных трещин [3]. Все указанные дефекты слитка пагубно сказываются на пластичности металла при горячей механической обработке, качестве готовых изделий и сроке их службы.

Задача получения высококачественного металла сводится к обеспечению минимального содержания в нём вредных примесей (неметаллических включений, газов, серы, фосфора) и обеспечению максимальной химической и физической однородности его.

Современные способы производства легированных сталей и сплавов в электрических дуговых и индукционных печах уже не обеспечивают требуемые особо высокие механические и физические свойства металла.

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		19

Разработанный в Институте электросварки имени Е.О. Патона АН УССР на основе электрошлакового сварочного процесса способ повышения качества металла - электрошлаковый переплав расходуемых электродов в водоохлаждаемой металлической изложнице – значительно превосходит все другие технологические процессы, применяемые в сталеплавильном производстве.

Главным результатом электрошлакового передела металла, очищающих металл от вредных примесей и неметаллических включений, улучшающих его структуру, является существенное повышение показателей пластичности, вязкости при практически неизменном уровне прочностных свойств [4]. Это замечательное свойство металла, освобождённого от загрязняющих его примесей, достаточно плотного и однородного, имеющего требуемое строение, позволяет, используя запас вязкости и пластичности, заметно повысить прочность стали или сплава.

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		20



### 3 ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ, ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ И РАЗЛИВКИ СТАЛИ МАРКИ 38Х2МЮА-Ш

#### 3.1 Технологическая цепочка производства стали марки 38Х2МЮА-Ш

Жаропрочную релаксационностойкую сталь марки 38Х2МЮА выплавляют по классической технологии в специализированных открытых дуговых печах ёмкостью от 5 до 20 тонн. Классическая технология предполагает выплавку качественной стали с длительной выдержкой металлического расплава в печи и проведением двух технологических периодов обработки расплава – окислительного и восстановительного. Низкая производительность печей, работающих по классической технологии, обуславливает большой удельный расход электроэнергии, электродов, огнеупоров и других материалов. Проведение восстановительного периода в печи характеризуется повышенным угаром легирующих элементов, а неполное использование мощности трансформатора в этот период снижает энергетический коэффициент полезного действия дуговой печи.

Методы выплавки стали выделяют следующие:

- 1) выплавка на углеродистых отходах с окислением окатышами (рудой);
- 2) переплав легированных отходов с кислородом;

Требования, предъявляемые к жаропрочным релаксационностойким сталям по содержанию вредных примесей определяют целесообразность выплавки стали на свежей шихте. Однако углеродистая шихта характеризуется повышенным содержанием фосфора и серы. Для передела такой шихты в качественную сталь требуется проведение окислительного периода с применением твердых окислителей. Окислительный период при данном методе характеризуется интенсивным кипением ванны в результате протекания реакций окисления углерода, что позволяет наряду с окислением вредных примесей получать качественную сталь с малым содержанием в ней растворенных газов (азота и водорода). Однако при данном методе выплавки наблюдается угар некоторых содержащихся в шихте элементов (хрома), к тому

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		21

же данный метод выплавки имеет высокую себестоимость, так как он предполагает осуществление легирования стали ферросплавами.

При выплавке стали методом переплава легированных отходов с кислородом можно исключить проведение окислительного периода или значительно сократить длительность его проведения. Легирующие элементы поступают с шихтой, что уменьшает использование в дальнейшем технологическом процессе ферросплавов для легирования стали. Поэтому данный метод имеет относительно невысокую себестоимость выплавки стали. Недостатком данного метода является затрудненное протекание дефосфорации и дегазации расплава. Поэтому при данном методе выплавки подбирают чистую по фосфору шихту и проводят продувку ванны кислородом.

Переплав легированных отходов без кислорода и смешение в ковше двух плавок, выплавленных на печах любым из вышеперечисленных методов, применяются на производстве достаточно редко, так как требует дополнительных условий для проведения плавки.

Требования, предъявляемые к качеству жаропрочной стали, представляют собой важный вопрос. В результате электрошлакового переплава достигается значительное очищение металла от серы. Так, содержание серы снижается от 0,015...0,020 до 0,003...0,006 %. Также расплавленный металл обладает исключительно высокой однородностью и плотностью. В нём полностью отсутствуют такие дефекты, как пористость, волосовины, пятнистая ликвация. Микроструктура переплавленного металла, так же как и макроструктура, отличается высокой однородностью. Вторые и избыточные фазы в переплавленном металле распределены более равномерно и мелкодисперсно, чем в металле обычного производства. При электрошлаковом переплаве наблюдается значительное очищение металла от газов [5]. Содержание кислорода снижается примерно вдвое, водорода – на 10...30 %, азота – в 1,5...2,5 раза. В результате электрошлакового переплава металл значительно очищается

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		22

от неметаллических включений. Общее содержание включений в металле снижается в 2...3 раза.

### 3.2 Метод выплавки

Выбираем метод выплавки переплавом легированных отходов с продувкой кислородом. Печь с желобом.

#### Подготовка печи к завалке

Заправка подины и откосов не очищенных от остатков шлака и металла запрещается. В качестве заправочных материалов следует применять периклазовые (магнезитовый) порошок 5мм или обожженный доломит, хромитоперик-лазовую крупку в смеси с периклазовым порошком в соотношении 1:1 до 1:3. Для выплавки хромосодержащих марок сталей при значительных повреждениях откосов допускается их заправка смесью периклазового порошка с жидким стеклом в соотношении 1:10. После заправки печи необходимо осмотреть состояние свода и стен печи. Выпускное отверстие после каждой плавки следует тщательно очищать, не допуская порогов и наростов. Выплавка стали производится на печах с твердым состоянием подины и откосов без углублений, без нарушения сплошности футеровки стен, свода, с целыми электродами, при исправности и надежной работе охладительной системы, механизмов, электрооборудования. Для обеспечения нормального состояния футеровки печи необходимо соблюдать следующее: Разрушение футеровки подмазываются магнезитовым порошком на 2% смазке из водного раствора жидкого стекла и воды в растворе 1:3 по объему. Предварительно задний откос печи заправляется магнезитовым порошком. В случае, если в печи после выпуска остается шлак, по согласованию с руководством цеха производится завалка на сталь общего назначения. После заправки магнезитовый слой оставить на спекание на 10-15 минут. Уплотнители электродных отверстий устанавливаются на свод в горизонтальном положении на площадку из огнеупорной глины. Зазоры между уплотнителями и свода не допускаются. Состояние выпускного отверстия

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		23

должно обеспечивать выпуск металла и шлака из печи ровной неразбрызгивающей струей. После выпуска металла требуется сразу же проводить очистку откосов и подины от остатков шлака и металла при помощи струи сжатого воздуха, после чего приступить к заправке подины и откосов заправочными материалами.

### 3.3 Подготовка шихтовых материалов и их завалка

Мульды или корзина с металлошихтой, переданные из шихтового пролета в печной пролет, должны быть приняты мастером печи. В плавильной карте мастером шихтового пролета должны быть записаны составляющие металлошихты, приготовленной на данную печь, и их масса. Количество крупной шихты не должно превышать 40% завалки. Количество стружки в шихте допускается не более 20% от массы шихты. При наличии тяжелой непромасленной стружки, обеспечивающей завалку шихты в один прием, допускается использовать ее в количестве не более 40%. Ферросплавы из шихтового пролета должны подаваться в специальных коробах, мульдах на которых должны быть указаны марка ферросплава и процентное содержание основного легирующего элемента. Ферросплавы, погруженные из тары в короба, должны передаваться сталевару вместе с сертификатом качества. Ферросплавы, предназначенные для присадки в жидкий металл, должны быть прокалены в нагревательной печи до красна не менее 20 мин. Продолжительность времени от конца прокалики до использования ферросплавов, как правило не должно превышать 8 часов. Допускается и более длительное хранение ферросплавов при отсутствии их увлажнения. Все присаживаемые в печь (или ковш) легирующие должны быть предварительно взвешены и подготовлены к присадке: уложены в мульду и т.п. На рабочей площадке у печи должны храниться ферросплавы, необходимые для выплавки заданной марки стали. Хранение у печи легирующих, непредназначенных для выплавки заданной марки стали, запрещается. Газообразный кислород,

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		24

применяемый для продувки металла в печи, должен содержать не более  $0,8 \text{ г/м}^3$  влаги. В плавильной карте на плавке, где применяется кислород, мастером по плавке должно быть записано фактическое содержание влаги в кислороде. Трубопровод сжатого воздуха, применяемого в смеси с кислородом для продувки металла в печи, должен быть оборудован отстойником влаги. Окалина, применяемая при выплавке металла, не должна содержать посторонних примесей и подаваться на рабочую площадку в мульдах, на которых указывается тип окалины углеродистая и т.д. и масса окалины. Шлакообразующие материалы известняк, известь, плавиковый шпат, кварциты, шамот и т.д. должны поддаваться на рабочую площадку отдельно в контейнерах, коробах и мульдах. Шлакообразующие, применяемые в окислительный период и рафинировку, должны быть прокалены в нагревательных печах докрасна и иметь размер кусков 150 мм. После постановки вагона с известью в цех с одного из контейнеров не позднее, чем за 30 минут после поставки должна быть отобрана проба извести массой не менее 0,5 кг и в плотно закрытой таре направлена на экспресс-лабораторию для определения содержания  $\text{CaO}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . В пригодной для применения извести должно содержаться:  $\text{CaO}$  – не менее 88 %,  $\text{CO}_2$  – н.б. 4 %,  $\text{H}_2\text{O}$  – н.б. 1,5 %. Известь с содержанием  $\text{H}_2\text{O}$  более 1,5 % и до 3 % допускается использовать в плавлении или окислительный период, а после прокалики в нагревательной печи не менее 40 минут и в восстановительный период. Разложившуюся известь и известь с содержанием влаги более 3 % применять при выплавке стали запрещается. Пригодная к применению известь должна быть использована в течение 12 часов с момента постановки в цех. Влажность газообразного кислорода должна быть не более  $0,8 \text{ г/м}^3$ , что проверяется на кислородной станции. Шлакообразующие материалы перед присадкой в печь должны быть взвешены или их масса определена при помощи специальной мерной емкости. В качестве «последней» допускается использование мульд, не имеющих наваров, прогаров, деформаций, приводящих к искажению

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		25

внутреннего объема. Перед началом завалки сталевар обязан принять от мастера шихтового пролёта точное количество и местонахождение мульд (корзины) с шихтой и мульд с ферросплавами, предназначенными для завалки и ведения плавки, записать их количество в плавильную карту. После ознакомления характером шихты в мульдах сталевар дает команду на завалку в печь шихты, придерживаясь следующего порядка: на подину мелкой шихты, затем, при необходимости, углеродосодержащие добавки (кусковой кокс, электродный бой), далее крупную и среднюю шихту и сверху оставшуюся часть мелкой шихты, в том числе стружку. Малоуглеродистые отходы и мягкое железо следует заваливать в середину печи, легированные отходы ближе к откосам. Феррохром, при наличии его в завалке, следует давать ближе к откосам печи. Для стали марочным содержанием хрома не более 6% шихта должна состояться из расчета максимального использования легированных отходов. Расчетное содержание хрома в шихте должно определяться химсоставом выплавляемой стали и возможностью получения заданного содержания углерода. При недостатке хромосодержащих отходов допускается использование высокоуглеродистого феррохрома в завалку. Разрешается использовать шихтовую болванку, выплавляемую на металлообразивных отходах, в количестве не более 25 % от массы завалки. При выплавке переплавом легированных отходов с кислородом, шихта должна состояться из расчета суммарного содержания титана, алюминия, кремния не более 1,2 %. Сталевары обязаны перед завалкой ознакомиться с состоянием погрузки шихты в корзину, не допускается наличие выступающих за ее края концов и свешивание стружки. При опускании корзины в печь необходимо следить, чтобы корзина не раскачивалась и не задевала за стенки печи. Затвор корзины следует открывать на высоте ее нижней части не более 0,5 м от подины. 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

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		26

порции, мелкой шихты в колодцы под электроды в первой половине плавления. В завалку следует присаживать известь и разжижители шамот, в соотношении 2:1 из расчета 3,0 % от массы завалки.

### 3.4 Период плавления

После завалки шихты перед включением печи сталевар совместно с дежурным персоналом службы механиков и электриков обязан осмотреть и проверить исправное действие системы водяного охлаждения, отвода газов из печи, механического и электрического оборудования и произвести прессовку водоохлаждающей арматуры, о чём делается соответствующие записи в плавильной карте. Перед включением печи необходимо проверить состояние (наличие сколов, трещин) и длину электродов. Электроды должны быть без видимых повреждений, а 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. Плавление шихтовых материалов следует проводить на максимальной мощности трансформатора. Порог завалочного окна следует заправлять в первой половине плавления. 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.

Присадку кремнийсодержащих материалов при недостаточном содержании кремния в шихте следует производить в конце плавления. После расплавления всей шихты по достижении температуры металла 1520 °С и перемешивания металла следует отобрать пробу на содержание С, Si, Mn, S, Cr, Ni. После получения анализа первой пробы, рекомендуется произвести корректировку химического состава металла. Периодом плавления считается продолжительность времени от момента включения печи после завалки шихты до момента получения содержания углерода и, при необходимости, других

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		27

элементов, удовлетворяющих требованиям проведения следующего периода плавки и начала подачи кислорода в металл на плавках переплав с кислородом. Периодом плавления считается продолжительность времени от момента включения печи после завалки шихты до момента получения содержания углерода и при необходимости других элементов, удовлетворяющих требованиям проведения следующего периода плавки и начала подачи кислорода в металл на плавках переплав с кислородом. В процессе расплавления шихта более легковесна и склонна к образованию мостов, её следует периодически сталкивать с откосов печи ближе к середине ванны. По этой же причине к моменту проплавления колодцев под электродами оказывается мало жидкого металла, он сильно перегревается, в результате начинается восстановление кремнезёма подины.

Для уменьшения угара железа и легирующих элементов в период плавления в печь присаживают шлак от предыдущей плавки, кварцевый песок или отработанную формовочную землю и известняк. К моменту полного расплавления ванна покрыта железистым шлаком, содержащим – 40 % FeO, 45 – 50 % SiO<sub>2</sub>, 20 % MnO и в небольших количествах CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и другие оксиды. Допускается для создания жидкоподвижного шлака использовать шамотный бой, прокаленный боксит или отработанный флюс АНФ-6, плавиковый шпат.

Скачивание плавильного шлака производят в случаях: получение магниального шлака, наличие повышенного содержания Mn, Cr в металле. Отбор проб металла после продувки кислородом следует проводить не ранее, чем за 5 минут по окончанию продувки. Допускается снижение содержания углерода от нижнего предела марочного состава не более чем на 0,25%. Перед выпуском плавки измеряется температура металла, которая должна быть 1590-1600 °С.

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		28



### 3.5 Окислительный период

Окислительный период следует начинать после расплавления 70-80 % шихты при хорошо нагретом металле. Визуальным признаком хорошего нагрева является слив металла с ложки без остатка. Началом окислительного следует считать момент подачи кислорода. Задачами окислительного являются:

- снижение содержания фосфора ниже допустимых пределов в готовой стали.
- возможно полное удаление растворённых в металле газов (азота и водорода).
- нагрев металла до температуры, превышающей на 120-130 °С температуру ликвидуса.
- приведение ванны в стандартное по окислённости состояние.

Начинать присадку руды следует после предварительного подогрева металла, чтобы сразу же после введения руды началось окисление углерода и кипением металла. Руду и известь необходимо загружать равномерными порциями, поддерживая интенсивное кипение металла. Началом окислительного периода следует считать момент подачи кислорода и содержания С 0,4 - 0,6 %. Для контроля за ходом окислительных процессов регулярно через каждые 5-10 минут обирают пробы металла, в которых контролируют содержание фосфора и углерода. При содержании фосфора < 0,02 % окисление рудой можно прекратить. Окислительная продувка металла кислородом должна производиться при давлении кислорода не менее 0,7 кг/м.

В следствии высокого содержания FeO в шлаке окисление углерода и вызванное этим кипение ванны могут начаться без дополнительных присадок окислителей, когда металл прогреется до определённой температуры. Вызвать интенсивное кипение ванны можно также присадкой извести. С целью снижения угара хрома в окислительный период допускается: начиная с содержания углерода на уровне 0,10 - 0,20 %, продувку смесью кислорода и воздуха в ориентировочном соотношении 70 % кислорода и 30 % воздуха.

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		29

Окислительную продувку прекращают при достижении содержания углерода, обеспечивающего нормальное проведение восстановления и получение заданного химического состава. За время продувки необходимо окислить 0,25 %.

Вторую пробу на химический анализ следует отобрать во время продувки сразу после появления пламени в печи момент загорания углерода содержание углерода в конце окислительного периода должно быть не менее 0,35 %. Окислительный шлак полностью снимается и наводится основной рафинирование шлака. Содержание углерода в металле перед снятием окислительного шлака должно обеспечивать нормальное проведение рафинировки и попадания в заданный химический состав. Скорость окисления углерода при этом составляет 0,2 - 0,3 %/ч в конце периода.

### 3.6 Восстановительный период

Началом восстановления следует считать момент присадки углеродосодержащих материалов, раскислителей или шлакообразующих. В случае получения низкого содержания углерода в пробе металла, отобранной в конце окислительного периода, допускается науглероживание металлической ванны сухими углеродосодержащими материалами, которые должны присаживаться на зеркало металла после снятия шлака. Восстановление должно проводиться с осадочным раскислением под белым шлаком. В металл должны вводиться кусковой алюминий на штанге в количестве 0,3 кг/т и кусковой 45 – 75 % ферросилиций, из расчета получения 0,60 % кремния, ФС - 75 раскисляет и легирует 2,5 %. При выплавке стали 38X2МЮА-Ш для легирования кремнием допускается использовать ферросиликохром, ФХ100 который должен присаживаться в раскислинный дающий усадку металлу, не позднее, чем за 20 минут до выпуска из печи. Температура металла перед выпуском из печи не менее 1560-1600 °С. Окончательное раскисление металла должно производиться кусковым силико-кальцием в количестве 3-4 кг/т присаживается

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		30

перед выпуском плавки в ковш. В течение периода восстановления следует производить перемешивание ванны не менее чем двумя гребками:

- перед отбором каждой пробы металла на химический анализ;
- перед присадкой в печь порошков кокса, ферросилиция, алюминия, силикокальция и так далее.
- после присадки в печь «кусковых» раскислителей (ферромарганца, ферросилиция);
- после присадки в печь ферросплавов для корректировки химического состава;
- перед измерением температуры металла;
- перед выпуском металла из печи.

Рафинировочный шлак должен наводиться шлаковой смесью, в качестве разжижителей следует применить шамот, кварцевый песок, динас. После расплавления шлаковой смеси, печь должна быть максимально уплотнена для предотвращения засоса воздуха и переключения на напряжении, обеспечивающем достаточную жидкоподвижность шлака и необходимую температуру металла. Подводимую мощность по ходу восстановления следует постепенно снижать и к концу восстановления она должна быть минимальной допустимой, обеспечивающей заданную температуру металла при выпуске. Металл, подвергаемый обработке инертными газами, допускается подогревать в последние 10 - 15 минут перед выпуском из печи. Во время подогрева металл необходимо тщательно перемешивать с интервалом 5 минут, при выплавке переплавом легированных отходов с кислородом, в исключительных случаях, при необходимости доводки химсостава стали допускается присаживать в печь мягкое железо в виде прутков, полос или углеродистые отходы в количестве не более 50 кг/т, массой кусков не более 50 кг. Выпуск плавки при этом следует производить не раньше, чем через 30 минут с момента окончания присадки мягкого железа или отходов при условии полного растворения добавок. Продолжительность рафинировки должна быть: 5 - 15 минут, без продувки Ar, в

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		31

ковше 1 - 2 часа окончательное раскисление металла должно производиться кусковым силико-кальцием в количестве 3/4 кг/т, присаживаемым в ковш перед выпуском плавки температура металла в ковше должна быть: 1540-1580 °С для стали 38Х2МЮА-Ш.

### 3.7 Порядок введения раскислителей и легирующих

Раскислением называют понижение содержание кислорода в стали или связывание его в прочные соединения, когда исключаются с углеродом. Наиболее распространённым методом раскисление является «глубинное» (осадочное). Для легирования и раскисление применяются ферросплавы и технически чистые элементы, которые могут даваться в виде крупных размером не менее 30 мм и мелких размером не более 30 мм, а также порошков фракции не более 2 мм. Мастер, ведущий плавку, должен иметь точные данные о химическом составе используемых материалов. Для легирования стали кремнием следует применять кусковые, ФС75 и ферросиликохром. Ферросплав должен присаживаться в хорошо раскисленный, дающий усадку металл за 10-20 минут до выпуска. При корректировке состава по хромю использовать феррохром или хром металлический. Алюминий вводят в печь после скачивания окислительного шлака для предварительного раскисление. Ферросплавы, легированные отходы и другие материалы необходимые для выплавки стали 38Х2МЮА–Ш. Порядок присадки ферросплавов.

Хром, как и марганец, по ходу плавки может «окислиться» или восстанавливаться в зависимости от состава и температуры процесса. Распределение хрома между металлом и шлаком, степень окисления хрома, пропорционально содержанию FeO в шлаке. При выплавке с окислением основное количество феррохрома, предназначенного для легирования стали должно присаживаться после наведения (обновления) или одновременно с наведением (обновлением) рафинировочного шлака в предварительно раскисленный металл. Доведение до химического состава.

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		32

Раскисление кусковым силикокальцием необходимо производить путем введения его в металл трайб-аппаратом допускается замена порошкообразного силикокальция на кусковой, вводимый в печь ковш.

Кремний при плавке в печах образующихся кремнезём связывается в шлаке в прочные соединения типа силикатов, по-видимому, главным образом ортосиликата кальция  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ . Для легирования стали кремнием следует применять кусковой 45, 65, 75 % ферросилиций. Ферросплавы должны присаживаться в хорошо раскисленный, дающий усадку металл за 10 - 20 минут до выпуска с последующим перемешиванием ванны. Допускается использование кускового ферросилиция для раскисление окислительного шлака при выплавке стали переплавом с кислородом.

Марганец окисление и восстановление марганца в процессе плавки стали происходит на границе раздела металла со шлаком. При большей основности шлака отношение равно 1,2 - 1,3. Для предварительного раскисление стали основное количество марганецсодержащих ферросплавов должно присаживаться в первой половине рафинировки. Окончательная корректировка химического состава должна производиться не менее чем за 5 минут до выпуска металла из печи из расчета введения марганца не более 0,40 % при выпуске под основным шлаком.

Алюминий для предварительного раскисление кусковой алюминий следует вводить в глубину металла на штанге в соответствии с требованиями ТИ. Кусок алюминия, вводимый на одной штанге, должен иметь массу не более 4 - 5 кг, и крепиться через сквозное отверстие в куске или путем запрессовки под молотом таким образом, чтобы исключить всплывание куска на поверхность плавки.

### 3.8 Выпуск плавки

Выпуск производим в сталеразливочный ковш. Ковш под плавку подаётся очищенный от остатков металла и шлака, с хорош состоянием сливного носка.

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		33

Допускается наличие шлакового гарнисажа в районе шлакового пояса, выступающего во внутрь ковш не более чем на 100 мм. Ковш должен иметь температуру внутренней поверхности футеровки не ниже 900 °С. Контроль температуры проводится на стенке ковша на расстоянии от 0,5 - 1,0 метра от дна, не более чем за 10 минут до начала выпуска металла из печи. Ковш поднимают с установки высокотемпературного разогрева не более чем за 10 минут до выпуска плавки и очищают сталеразливочный канал. Засыпку сталеразливочного ковша производят прокаленным песком или отработанной

формовочной смесью. Уровень засыпки должен быть не ниже уровня дна ковша. Во время выпуска принимаются меры для обеспечения компактной струи и надежного отсечения плавильного шлака от металла.

Для этого используется специальная система выпуска эркерный выпуск. Обычно ковш имеет форму усеченного конуса с широким основанием вверху и конусностью 50 мм на 1 м. Объем ковша должна быть таким, чтобы принять весь металл и ~ 5 % шлака (от массы металла). Избыточный шлак сливают через носок, опущенный на 100 - 200 мм ниже верхнего края ковша. Стойкость футеровки ковша составляет 10 - 12 плавов, заново офутерованный ковш сушат и разогревают до 600 – 800 °С при помощи форсунки или горелки. Ремонт футеровки ковша сводится к удалению скрапа металла, подмазке или торкретированию изношенных мест и установке стакана и стопора. Разливка стали из сталеразливочного ковша осуществляются либо с применением стопорного механизма, либо при помощи шибера. При стопорной разливки в дно ковша устанавливают шамотный или магнезитовый стакан с отверстием 35-60 мм, и больше. Отверстие стакана прикрывают пробкой стопора.

Стопор представляет собой стержень диаметром 40 - 50 мм с надетыми на него шамотными трубками (стопорными катушками). Благодаря наличию на стопорных трубках замкового устройства буртика и паза. Обеспечивается стыковое соединение по наружной поверхности. Стопор набирают на огнеупорной массе и сушат при температуре ~ 120 °С в вертикальных сушилах.

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		34

Разливка осуществляется при совмещении отверстия ковшового стакана с отверстиями неподвижной плиты, подвижной плиты и стакана затвора. При тщательном изготовлении затвора его используют на нескольких плавках. Для изготовления плит и стаканов применяют различные материалы: периклазовые, корундовые, высокоглинозёмистые, нитридокремневые и т.д. При использовании бесстопорного ковша снижается расход огнеупорных материалов, упрощается подготовка ковша, уменьшаются трудовые затраты в различном пролёте, точнее выполняется режим разливки. Перед выпуском из печи, мастер по плавкам должен проверить качество подготовки желоба. Желоб должен быть в исправном состоянии, хорошо просушен и очищен, с гладкой поверхностью, без трещин. Выпуск плавки по неочищенному и непросушенному желобу запрещается. Выпуск металла из печи должен производиться компактной не разбрызгивающейся струей. Выпуск плавки должен производиться в ошлакованный ковш. Температура металла в ковше должна быть 1540 – 1580 °С.

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		35

## 4 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА СТАЛИ МАРКИ 38Х2МЮА - Ш

### 4.1 Требования к исходным материалам, применяемых при электрошлаковом переплаве

Металл, назначенный на ЭШП должен удовлетворять следующим требованиям:

- назначение металла на ЭШП производится производственным отделом завода;
- металл выплавлен в сталеплавильном агрегате: в соответствии с действующей нормативно-технической и технологической документацией, в том числе по химическому составу.

### 4.2 Требования к расходуемым электродам

Расходуемые электроды для электрошлакового переплава стали марки 38Х2МЮА получают на МПНЛЗ.

На торце электрода маркировка номера плавки, литеры штанги и марки стали.

Кривизна электродов для ЭШП не более 5 миллиметров на 1 метр длины и не более 25 миллиметров на всю длину электрода.

Поверхность электродов должна быть зачищена, ободрана или протравлена. При этом глубина выточек не должна превышать 20 % меньшей стороны электрода.

На поверхности электродов не допускается наличие ржавчины, шлаковых включений диаметром более 10 миллиметров, рванин, поперечных трещин, плён, продольных трещин шириной более 10 миллиметров.

При выявлении на торцах электродов дефектов типа свищи или при наличии поверхностных пузырей глубиной более 10 миллиметров, расходуемые

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		36



электроды должны передаваться на термообработку в термозачистное отделение.

#### 4.3 Требования к флюсам

Химический состав флюсов должен соответствовать техническим условиям.

Проведение ЭШП с использованием жидкого флюса АНФ - 6 при условии выплавки флюса в флюсоплавильной печи.

Чистый фтористый кальций плавится при температуре 1410 °С, но шпат промышленной чистоты плавится при более низкой температуре, так как содержание в нём менее 0,5 % СаО достаточно для снижения температуры плавления до 1380 °С. Хотя этот флюс и обладает сравнительно низкими технологическими свойствами, он имеет минимальную окислительную способность и поэтому применяется при ЭШП жаропрочной стали 38Х2МЮА - Ш.

Расплавление флюса производится в специальной электрической печи, имеющей угольную футеровку с последующей заливкой его в кристаллизатор – жидкий старт. После расплавления флюс сливают в ковш и транспортируют к электрошлаковой печи.

Заливку флюса производят через специальное нижнее заливное устройство, это исключает разбрызгивание. Запрещается использовать флюс, загрязненного различными видами примесями (огнеупорами, металлической стружкой и так далее).

При заливке в кристаллизатор должен использоваться флюс при соответствии среднего химсостава.

#### 4.4 Подготовка установки ЭШП к переплаву

На поддон устанавливается кристаллизатор. Электрод зажимается в клещевом электрододержателе и центруется по отношению к стенкам кристаллизатора.

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		37

После установки кристаллизатора сверху на поддон заливают флюс в количестве, соответствующем требованиям.

Перед включением установки ЭШП сталевар совместно с дежурным ремонтным персоналом должен осмотреть систему водяного охлаждения, механическое и электрическое оборудование (включая дозатор).

Эксплуатация установки ЭШП при наличии любой неисправности в работе механического или электрического оборудования, а также при наличии течи или парения воды в системе водяного охлаждения запрещается.

Пригодность установки ЭШП для проведения переплава определяется мастером по плавке и контролером ОТК, что подтверждается их подписями в плавильной карте.

#### 4.5 Проведение процесса электрошлакового переплава

Электроды после установки и центровки опускаются до предполагаемого после заливки уровня флюса в кристаллизаторе. Печь сразу включается на рабочий режим, и заливается шлак.

В момент, когда уровень шлака, заливаемого в кристаллизатор, приблизится к заданному, в цепи расходомерного электрода начинает протекать ток. В этот момент заливку шлака прекращают. Характерным признаком появления дуги служит снижение силы тока и гудение (клокотание) внутри кристаллизатора.

Для получения металла высокого качества необходимо обеспечить бездуговой режим растекания тока по шлаку, который характеризуется соответствующим положением конца электрода в ванне. Оптимальная форма оплавливающейся части электрода представляет собой правильный конус. Высота конуса контролируется при ЭШП первого слитка плавки и должна быть 60...80 миллиметров. При наплавлении остальных слитков плавки конус сплавляется путём оставления «огарка» электрода в шлаковой ванне.

Следует работать на дифференцированном электрическом режиме, предусматривающем изменение рабочей силы тока и напряжения по ходу

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		38

плавки, так как по мере наплавления слитка вследствие уменьшения длины расходуемого электрода уменьшается активное и индуктивное сопротивление короткой сети печи.

Если плавку ведут при неизменных значениях силы тока и напряжения на трансформаторе, мощность на шлаковой ванне увеличивается, уменьшается скорость затвердевания слитка по высоте.

Чтобы получить высококачественный металл следует производить плавное уменьшение вводимой мощности путем изменения силы тока и напряжения. Это позволит обеспечить заданные скорости наплавления слитка при оптимальных форме и глубине металлической ванны.

После наплавления слитка заданной высоты и массы приступают к выведению усадочной раковины. За 30...40 минут до окончания переплава проводят плавное снижение силы тока до 4...5 кА с одновременным уменьшением напряжения до минимально возможного переключением ступени трансформатора. Последующую «подпитку» производить за счёт сплавления погруженной в шлак (заглубление фиксируется изменением на показывающем приборе силы тока с 4...5 кА до 6...7 кА) части электрода при отключенной подаче.

Следует производить раскисление шлаковой ванны порошком 30 % ферротитана из расчета 2,5 килограмма на тонну металла. Присадка начинается через 20...25 минут после включения печи и продолжается в течение всей плавки. Подготовка порошка ферротитана оговаривается внутризаводскими инструкциями.

Об окончании процесса судят по достижению зеркалом шлаковой ванны нижнего уровня сливных патрубков кристаллизатора или сплавлению годной части электрода.

Окончание плавки производят следующим образом: прекращают подачу электрода, при этом питание установки не отключают. Электрод выдерживают до полного оплавления погруженной в шлак части, что сопровождается

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		39

постепенным снижением силы тока до нуля и появлением дуговых разрядов между торцами электрода и поверхностью шлаковой ванны. Затем электродержателем поднимают до вывода огарка электрода из кристаллизатора, напряжение отключают.

После окончания переплава все системы установки ЭШП, за исключением подачи воды в кристаллизатор и поддон, отключаются.

После извлечения огарка электрода из кристаллизатора и его охлаждения измеряется длина, которая должна быть не менее 400 миллиметров.

Рациональное программирование электрического режима ЭШП на стадии окончания плавки позволяет получить практически горизонтальную поверхность верхней части слитка.

#### 4.6 Охлаждение слитков

По окончании переплава, выплавленный слиток статически должен быть выдержан в кристаллизаторе в течение 70...90 минут.

После выдержки слитка в кристаллизаторе в течение установленного времени отключается подача воды, слиток освобождается от кристаллизатора, после чего производится:

- измерение толщины шлаковой «лепёшки», которая должна быть в пределах 130...160 миллиметров;
- измерение геометрических параметров слитка;
- осмотр качества поверхности слитка;
- маркировка металлическими клеймами верхнего торца слитка номером плавки и номером слитка;
- взвешивание и передача слитка в ТЗО, при этом продолжительность времени с момента его раздевания не должна быть более 30 минут.

Слитки, выплавленные из электродов, изготовленных из металла одной исходной плавки, на установках одного типа, в кристаллизаторах одного

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		40

профилеразмера, на флюсе одной партии, на электрорежиме, установлением для данной марки стали, маркируются одним номером плавки.

#### 4.7 Техника безопасности

При выполнении работ, связанных с подготовкой и использованием материалов, механизмов ЭШП, инструмента и приспособлений, а также выполнении технологических операций при выплавке сталей и сплавов в электрошлаковых печах и выпуске их в ковш, должны соблюдаться требования инструкций по безопасности труда для подручных сталеваров и сталеваров установок ЭШП электросталеплавильного цеха [6].

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		41

## 5 ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И РАСЧЁТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТАЛИ МАРКИ 38Х2МЮА - Ш

### 5.1 Геометрический расчёт плавильного пространства

Расчёт определяющего размера слитка

$$k_{\text{сл.}} = \frac{l_{\text{сл.}}}{l_{\text{о.сл.}}}, \quad (1)$$

где  $k_{\text{сл.}}$  – коэффициент формы слитка;  $k_{\text{сл.}} = 4...5$ ;

$k_{\text{сл.}} = 4$ , так как будем получать сортовой слиток квадратного сечения, подразумеваем дальнейший передел – прокатку;

$l_{\text{сл.}}$  – длина слитка, м;

$l_{\text{о.сл.}}$  – определяющий размер слитка, м.

$$m = d \times V, \quad (2)$$

где  $m$  – масса слитка, кг;

$d$  – плотность стали, кг / м<sup>3</sup>;

$d = 7800$  кг / м<sup>3</sup>;

$V$  – объём стали, м<sup>3</sup>.

$$V = S_{\text{осн.}} \times l_{\text{сл.}}, \quad (3)$$

где  $S_{\text{осн.}}$  – площадь основания слитка, м<sup>2</sup>

$$S_{\text{осн.}} = l_{\text{о.сл.}}^2. \quad (4)$$

Согласно формулам (1), (2), (3), (4) получаем:

$$l_{\text{о.сл.}} = \sqrt[3]{\frac{m}{k_{\text{сл.}} \times d \times v}}; \quad (5)$$

где  $v$  – коэффициент, зависящий от формы поперечного сечения площадью  $S_{\text{сл.}}$ . Принимаем  $v = 1$ .

$$l_{\text{о.сл.}} = \sqrt[3]{\frac{4}{4 \times 7,8 \times 1}} = 0,504 \text{ м}$$

Расчёт определяющего размер кристаллизатора

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		42

$$l_{\text{о.кр.}} = l_{\text{о.сл.}} \times k_{\text{л.}} + 2 \times \Delta_{\text{г}}, \quad (6)$$

где  $k_{\text{л.}}$  – коэффициент линейной усадки при кристаллизации;

$$k_{\text{л.}} = 1,02;$$

$\Delta_{\text{г}}$  – толщина гарнисажа, м.

$$l_{\text{о.кр.}} = 0,504 \times 1,02 + 2 \times 0,002 = 0,518 \text{ м}$$

Принимаем кристаллизатор с сечением  $0,55 \times 0,55$  м. В таком кристаллизаторе слиток будет иметь размеры:

$$l'_{\text{о.сл.}} = a_{\text{сл.}} = \frac{(0,55 - 2 \times 0,002)}{1,02} = 0,535 \text{ м}$$

$$l'_{\text{сл.}} = \frac{4,0}{(7,8 \times 0,535^2)} = 1,792 \text{ м}$$

$$k'_{\text{сл.}} = \frac{1,792}{0,535} = 3,350,$$

что соответствует условию для сортовых слитков.

Выбор печи

Выбираем однофазную (одноэлектродную) печь, которая выплавляет передельные слитки квадратного сечения (массой до 4 тонн).

В существующих однофазных печах длина и форма контура в процессе плавки значительно изменяется из-за постепенного укорочения расходуемого электрода, это приводит к изменению напряжения на шлаковой ванне и изменению условий плавки электрода и кристаллизации слитка. Все это приводит к снижению стабильности металла.

Необходимо создание печей с хорошей компенсацией токоподвода и минимальной длиной контура: это может быть достигнуто за счёт сокращения длины токоведущей части расходуемого электрода. Процесс реализуется на установке электрошлакового переплава ЭШП Р – 951.

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		43

Расчёт длины электрода

$$l_{\text{эд.}} = \frac{l_{\text{сл.}}}{k_{\text{з.сл.}}^2}, \quad (7)$$

где  $l_{\text{сл.}}$  – длина слитка, м;

$k_{\text{з.сл.}}$  – коэффициент заполнения слитка.

$$k_{\text{з.сл.}} = \sqrt{\frac{N \times S_{\text{эд.1}}}{S_{\text{сл.}}}}, \quad (8)$$

где  $N$  – количество электродов;

$S_{\text{эд.1}}$  – площадь поперечного сечения слитка,  $\text{м}^2$ ;

$S_{\text{сл.}}$  – площадь поперечного сечения слитка,  $\text{м}^2$ .

В виду того, что мы выбрали квадратный электрод, то относительный зазор между электродом и стенкой кристаллизатора принимаем:

$$\frac{\Delta}{l_{\text{о.эд.}}} = 0,23$$

Сторону  $a_{\text{эд.}}$  квадратного сечения электрода, являющуюся линейным определяющим размером  $l_{\text{о.эд.}}$  при использовании одного электрода квадратного сечения определяем по формуле:

$$\frac{a_{\text{эд.}}}{a_{\text{кр.}}} = \frac{1}{(1 + (\Delta/l_{\text{о.эд.}}))} \quad (9)$$

Тогда согласно формуле (9):

$$\frac{a_{\text{эд.}}}{a_{\text{кр.}}} = \frac{1}{(1 + 0,23)} = 0,813;$$

$$a_{\text{эд.}} = 0,813 \times 0,55 = 0,447 \text{ м} = 0,450 \text{ м}$$

Тогда с учётом найденного значения  $a_{\text{эд.}}$  коэффициент заполнения слитка:

$$k_{\text{з.сл.}} = \sqrt{\frac{(0,450)^2}{0,504^2}} = 0,893$$

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		44



Коэффициент заполнения кристаллизатора:

$$k_{з.кр.} = \sqrt{\frac{N \times S_{эд.1}}{S_{ср.кр.}}}, \quad (10)$$

где  $S_{ср.кр.}$  – среднее сечение кристаллизатора,  $м^2$ .

$$k_{з.кр.} = \sqrt{\frac{(0,450 \times 0,450)}{0,550^2}} = 0,818$$

По формуле (7) длина оплаиваемой части электрода равна:

$$l_{эд.} = \frac{1,792}{0,893^2} = 2,247 \text{ м}$$

Принимаем  $l_{эд.} = 2,600 \text{ м}$ .

Полная длина электрода определяется по формуле:

$$l_{эд.} = l_{эд.} + l_0 + 0,050, \quad (11)$$

где  $l_{эд.}$  – длина оплаиваемой части электрода, м;

$l_0$  – длина неоплаиваемой части электрода, достигающая 1,5 м.

0,050 – длина огарка, м.

$$l_{эд.} = 2,600 + 1,500 + 0,050 = 4,150 \text{ м}$$

Расчёт массы электрода

$$m_{эл.} = d \times V, \quad (12)$$

где  $V$  – объём электрода,  $м^3$ .

Объём электрода будет равен:

$$V = l_{эд.} \times a_{эд.}^2, \quad (13)$$

$$V = 2,600 \times 0,450^2 = 0,526 \text{ м}^3$$

$$m_{эл.} = 7800 \times 0,526 = 4102,800 \text{ кг}$$

Принимаем  $m_{эл.} = 4105,000 \text{ кг}$ .

Расчёт длины кристаллизатора

$$l_{кр.} = (0,3...0,7)a_{кр.} + h_{шл.} + \Delta l, \quad (14)$$

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		45

где  $\Delta l$  – конструктивный размер кристаллизатора, м;

$h_{\text{шл.}}$  – высота флюса, м.

Найдём высоту шлака:

$$m_{\text{шл.}} = k_{\text{шл.}} \times m_0, \quad (15)$$

где  $m_{\text{шл.}}$  – масса шлака, кг;

$k_{\text{шл.}}$  – коэффициент кратности шлака;

$k_{\text{шл.}} = 0,02$ ;

$m_0$  – масса слитка, кг.

$$m_{\text{шл.}} = 0,02 \times 4000 = 80 \text{ кг}$$

$$m_{\text{шл.}} = d_{\text{ж.шл.}} \times V_{\text{шл.}}, \quad (16)$$

где  $d_{\text{ж.шл.}}$  – плотность жидкого шлака, кг / м<sup>3</sup>;

$V_{\text{шл.}}$  – объём шлака, без погруженного в него электрода, м<sup>3</sup>

Плотность жидкого шлака зависит от марки используемого флюса. В связи с тем, что марку стали 38Х2МЮА необходимо рафинировать от неметаллических включений, а также получить однородную структуру и высокое качество поверхности слитка, будем применять флюс марки АНФ-6.

Из формулы (16) объём шлака:

$$V_{\text{шл.}} = \frac{80}{2250} = 0,035 \text{ м}^3$$

Объём шлака с погруженным в него электродом будет:

$$V_{\text{шл. с пог.эл.}} = V_{\text{шл.}} + h_{\text{эд.}} \times S_{\text{эд.}} = h_{\text{шл.}} \times S_{\text{кр.}}, \quad (17)$$

где  $h_{\text{эд.}}$  – высота заглубления электрода в шлак, м;

$S_{\text{эд.}}$  – площадь поперечного сечения N электродов, м<sup>2</sup>;

$S_{\text{кр.}}$  – площадь поперечного сечения кристаллизатора, м<sup>2</sup>

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		46

$$\frac{h_{\text{эд.}}}{l_{\text{о.эд.}}} \approx 0,4 \dots 0,5 \quad (18)$$

$$h_{\text{эд.}} = 0,4 \times 0,450 = 0,180 \text{ м}$$

Из формулы (17) найдём  $h_{\text{шл.}}$ :

$$h_{\text{шл.}} = \frac{(0,035 + 0,450^2 \times 0,180)}{0,55^2} = 0,236 \text{ м}$$

Из формулы (14) определим длину кристаллизатора:

$$l_{\text{кр.}} = 1,792 + 0,236 + 0,150 = 2,178 \text{ м}$$

Проверка

С учётом электрофизических особенностей ЭШП:

$$\frac{h}{l_{\text{о.эд.}}} < 0,5, \quad (19)$$

где  $h$  – межэлектродный промежуток, м.

$$h = h_{\text{шл.}} - h_{\text{эд.}} \quad (20)$$

$$h = 0,236 - 0,180 = 0,056 \text{ м}$$

$$\frac{0,056}{0,450} = 0,124 < 0,500$$

что соответствует условию (21).

## 5.2 Тепловой расчёт плавки

### Расчёт полезной мощности

Полезная мощность рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{пол.}} = P_{\text{пол.эд.}} + P_{\text{пол.к.ш.}} + P_{\text{пол.в.}} = Q_{\text{м}} \times (\Delta\Delta_{\text{эд.}} + \Delta H_{\text{к.ш.}} + \Delta H_{\text{В}}) = Q_{\text{м}} \times W_{\text{у.т.}} \quad (21)$$

где  $P_{\text{пол.в.}}$  – полезная мощность со стороны ванны, идущая на перегрев металла, кВт;

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		47

$P_{\text{пол.к.ш.}}$  – полезная мощность, идущая на перегрев шлака, кВт;

$P_{\text{пол.эд.}}$  – полезная мощность на электроде, кВт

$\Delta H_{\text{эд.}}$  – удельное изменение энтальпии на электроде, кДж/кг;

$\Delta H_{\text{к.ш.}}$  – удельное изменение энтальпии в шлаке, кДж/кг;

$\Delta H_{\text{в.}}$  – удельное изменение энтальпии в ванне, кДж/кг;

$Q_{\text{м}}$  – массовая скорость переплава расходуемого электрода, кг/с;

$W_{\text{у.т.}}$  – удельный теоретический расход энергии, кДж/кг.

Удельный теоретический расход энергии находится по формуле:

$$W_{\text{у.т.}} = \int_{T_{\text{у}}}^{T_{\text{с}}} C_{\text{т.}} dT + \Lambda_{\text{ф}} + \int_{T_{\text{л}}}^{T_{\text{к}}} C_{\text{ж.}} dT + \int_{T_{\text{к}}}^{T_{\text{к.ш.}}} C_{\text{ж.}} dT + \int_{T_{\text{к.ш.}}}^{T_{\text{в}}} C_{\text{ж.}} dT \approx C_{\text{т.ср.}} \times (T_{\text{с}} - T_{\text{у}}) + \Lambda_{\text{ф}} + C_{\text{ж.ср.}} \times (T_{\text{в}} - T_{\text{л}}),$$

где  $C_{\text{т.ср.}}$  – средняя удельная теплоёмкость для твердого состояния, кДж/(кг · К);

$C_{\text{ж.ср.}}$  – средняя удельная теплоёмкость для жидкого состояния, кДж/(кг · К);

$\Lambda_{\text{ф.}}$  – удельная теплота фазового перехода, кДж/кг;

$(T_{\text{в}} - T_{\text{л}})$  – перегрев жидкого металла, поступающего в ванну, над температурой плавления (ликвидуса), составляющий при ЭСП 250...450 К в зависимости от температуры шлаковой ванны  $T_{\text{шл.}}$ ;

$T_{\text{с}}$  – температура солидуса, К;

$T_{\text{у}}$  – температура установившегося состояния, К;

$T_{\text{у}} = 650 \text{ К.}$

Определим температуру солидуса:

$$T_{\text{с}} = T_{\text{шл.}} - [(\Delta T_{\text{с}})_i \times (\Delta E)], \quad (22)$$

где  $T_{\text{шл.}}$  – температура плавления чистого железа, К;

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		48

$(\Delta T_c)_i$  – величина, показывающая, что при изменении на 1 % легирующего элемента, на сколько изменится температура чистого железа;

(E) – процентное содержание легирующего элемента в металле.

$$T_c = 1812 - \{(410 \times 0,4) + (186,4 \times 0,3) + (20 \times 0,5) + (4 \times 1,45) + (940 \times 0,02) + (184 \times 0,02) + (27,7 \times 0,15) + (8,9 \times 0,20) + (6,5 \times 0,9)\} = 1542,02 \text{ К}$$

Определим температуру ликвидуса (окончания плавления):

$$T_{\text{л}} = 1812 - \{(80,4 \times 0,4) + (13,6 \times 0,3) + (4,0 \times 0,5) + (1,4 \times 1,45) + (34 \times 0,02) + (34 \times 0,02) + (13,9 \times 0,15) + (4,3 \times 0,20) + (3,5 \times 0,9)\} = 1764,28 \text{ К}$$

Средняя удельная теплоёмкость твердого металла  $C_{\text{т.ср.}} = 0,6 \text{ кДж/кг}$ ; жидкого  $C_{\text{ж.ср.}} = 0,80 \text{ кДж/кг}$ . Удельная теплота фазового перехода  $\Lambda_{\text{ф.}} = 280 \text{ кДж/кг}$  [7].

Тогда:

$$W_{\text{у.т.}} = 0,6 \times (1542,02 - 650) + 280 + 0,8 \times (2061 - 1764,28) = 1052,60 \text{ кДж/кг}$$

Расчёт массовой скорости переплава

Массовая скорость переплава при ЭШП зависит от условия кристаллизации слитка, теплофизических свойств переплавляемого металла и определяющего размера кристаллизатора.

$$Q_m = \frac{k \times l_{\text{о.сл.}}}{k_{\text{ф}}}, \quad (23)$$

где  $k$  – параметр, зависящий от теплофизических свойств переплавляемого металла;

$l_{\text{о.сл.}}$  – определяющий размер слитка, м;

$k_{\text{ф}}$  – коэффициент фронта кристаллизации, характеризующий условия кристаллизации слитка;

$$k_{\text{ф}} = \frac{0,5 \times l_{\text{о.сл.}}}{h_{\text{м}}}, \quad (24)$$

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		49

где  $h_M$  – глубина жидкометаллической ванны, м.

Принимаем значения по данным Ю.М. Миронова:  $k = 0,27 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м})$  [7].

Тогда согласно формуле (24) коэффициент фронта кристаллизации, характеризующий условия кристаллизации слитка:

$$k_{\phi} = \frac{0,5 \times 0,504}{0,40} = 0,630$$

Тогда массовая скорость переплава расходуемого электрода по формуле (23):

$$Q_m = \frac{0,27 \times 0,504}{0,630} = 0,216 \text{ кг/с} = 777,600 \text{ кг/ч}$$

А согласно формуле (21):

$$P_{\text{пол.}} = 0,216 \times 1052,60 = 227,362 \text{ кВт}$$

Определение тепловых потерь

Мощность, передаваемая от шлака слитку

$$P_{\text{сл}} = 0,277 \times 10^{-3} \times \alpha_{\text{шл}} \times F \times (T_{\text{шл.}} - T_M), \quad (25)$$

где  $\alpha_{\text{шл}}$  – коэффициент теплоотдачи от шлака к металлу,  $\frac{\text{кВт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К})}$ ;

$$\alpha_{\text{шл}} = 3,48 \frac{\text{кВт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К})}$$

$F$  – площадь контакта между шлаком и металлом,  $\text{м}^2$ ;

$$F = 0,55^2 = 0,30 \text{ м}^2$$

$T_{\text{шл.}}$  – температура поверхности шлака, К;

$$T_{\text{шл.}} = 2099 \text{ К}$$

$T_M$  – температура поверхности металла, К;

$$T_M = 2034 \text{ К}$$

Тогда согласно формуле (25):

$$P_{\text{сл}} = 0,277 \times 10^{-3} \times 3,48 \times 0,30 \times (2099 - 2034) = 0,022 \text{ кВт}$$

Мощность, передаваемая от шлака стенке кристаллизатора

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		50

$$P_{\text{ст}} = 10^{-3} \times 4 \times l_{\text{о.кр.}} \times h_{\text{шл}} \times \frac{t_{\text{пл.шл.}} - t_{\text{ст.}}}{\frac{\delta_{\text{ст.}}}{\lambda_{\text{ст.}}} + \frac{\delta_{\text{шл.}}}{\lambda_{\text{шл.}}}}, \quad (26)$$

Где  $l_{\text{о.кр.}}$  – определяющий размер кристаллизатора, м;

$$l_{\text{о.кр.}} = 0,518 \text{ м}$$

$h_{\text{шл.}}$  – высота шлака, м;

$$h_{\text{шл.}} = 0,236 \text{ м}$$

$t_{\text{пл.шл.}}$  – температура плавления шлака, °С;

$$t_{\text{пл.шл.}} = 1390 \text{ °С [9]}$$

$t_{\text{ст}}$  – температура стенки кристаллизатора, °С;

$$t_{\text{ст}} = 100 \text{ °С}$$

$\lambda_{\text{ст}}$  – теплопроводность стенки кристаллизатора (для меди), Дж/(м · с);

$$\lambda_{\text{ст}} = 380 \text{ Дж/(м · с)}$$

$\lambda_{\text{шл}}$  – средняя теплопроводность шлака, Вт/(м · К);

$$\lambda_{\text{шл}} = 4,64 \text{ Вт/(м · К)}$$

$\delta_{\text{ст}}$  – толщина стенки кристаллизатора, м;

$$\delta_{\text{ст}} = 0,02 \text{ м}$$

$\delta_{\text{шл}}$  – толщина слоя шлака, м;

$$\delta_{\text{шл}} = 0,002 \text{ м}$$

Тогда согласно формуле (26):

$$P_{\text{ст}} = 10^{-3} \times 4 \times 0,518 \times 0,236 \times \frac{1390 - 100}{\frac{0,02}{380} + \frac{0,002}{4,64}} = 1401,777 \text{ кВт}$$

Поток излучения с поверхности шлака

$$P_{\text{изл.шл.}} = 10^{-3} \times \varepsilon_{\text{шл}} \times \sigma \times (F_{\text{кр.}} - F_{\text{эл.}}) \times (T_{\text{пов}})^4, \quad (27)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $\frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)}$ ;

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		51

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

$\varepsilon_{\text{шл}}$  – степень черноты шлака;

$$\varepsilon_{\text{шл}} = 0,7$$

$(F_{\text{кр.}} - F_{\text{эл.}})$  – теплоотдающая поверхность,  $\text{м}^2$ ;

$$(F_{\text{кр.}} - F_{\text{эл.}}) = (0,55^2 \times 0,450^2) = 0,061 \text{ м}^2$$

$T_{\text{пов}}$  – температура поверхности шлака, К;

$$T_{\text{пов}} = 2123 \text{ К}$$

Тогда согласно формуле (27):

$$P_{\text{изл.шл.}} = 10^{-3} \times 0,7 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 0,061 \times (2123)^4 = 49,182 \text{ кВт}$$

Поток излучения с поверхности электрода

$$P_{\text{изл.эл.}} = 10^{-3} \times \varepsilon_{\text{ст}} \times \sigma \times F \times (T_{\text{пов}})^4, \quad (28)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

$\varepsilon_{\text{шл}}$  – степень черноты стали;

$$\varepsilon_{\text{шл}} = 0,8$$

$F$  – теплоотдающая поверхность,  $\text{м}^2$ ;

$$F = (0,450 + 0,450) \times 2,600 = 2,340 \text{ м}^2$$

$T_{\text{пов}}$  – температура поверхности электрода, К;

$$T_{\text{пов}} = 600 \text{ К}$$

Тогда согласно формуле (28):

$$P_{\text{изл.эл.}} = 10^{-3} \times 0,8 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 2,340 \times (600)^4 = 13,756 \text{ кВт}$$

Тепло, теряемое с испарением шлака в ходе ЭШП

$$P_{\text{исп.шл.}} = \frac{0,03 \times \Lambda_{\text{ф}} \times m_{\text{шл.}}}{860}, \quad (29)$$

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		52



где  $\Lambda_{\phi}$  – удельная теплота фазового перехода 1-го рода при испарении  $\text{CaF}_2$ , кДж/кг;

Для флюса АНФ-6  $\Lambda_{\phi} = 7000$  кДж/кг [7].

$m_{\text{шл.}}$  – масса шлака, кг.

$$m_{\text{шл.}} = 80 \text{ кг}$$

Тогда согласно формуле (29):

$$P_{\text{исп.шл.}} = \frac{0,03 \times 7000 \times 80}{860} = 19,535 \text{ кВт}$$

Таблица 12 - Результаты расчёта теплового баланса

Приход	Расход		%
1711,634	Полезная мощность	227,362	13,28
	Мощность, передаваемая от шлака слитку, кВт	0,022	0,001
	Мощность, передаваемая от шлака к стенке кристаллизатора, кВт	1401,777	81,90
	Поток излучения с поверхности шлака, кВт	49,182	2,88
	Поток излучения с поверхности электрода, кВт	13,756	0,80
	Тепло, теряемое при испарении шлака в ходе ЭШП, кВт	19,535	1,14
1711,634	Мощность выделяемая в шлаковой ванне	1711,634	100

### 5.3 Электрический расчёт плавки

Определение сопротивления шлака

$$R_{\text{шл.}} = \frac{k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 \times \rho_{\text{шл.}}}{(I_{\text{опр.}})_{\text{экв.}}}, \quad (30)$$

где  $k_1, k_2, k_3, k_4$  – симплекс коэффициенты;

$$k_1 = f_1(h/h_{\text{шл.}});$$

$$\begin{aligned}
k_1 &= 1,13; \\
k_2 &= f_2(k_{3.кр.}); \\
k_2 &= 0,40; \\
k_3 &= f_3(\rho/l_{o.эд.}) = 0,92; \\
k_4 &\approx 1,3 \times (a_{эд.}/a_{эд.})^{-0,955} = 1,3,
\end{aligned}
\tag{31}$$

где  $a_{эд.}$  – сторона электрода, м;

$\rho_{шл.}$  – удельное сопротивление шлака, Ом·м;

$$\rho_{шл.} = 4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$(l_{опр.})_{экр.}$  – эквивалентный диаметр кристаллизатора, м;

$$(l_{опр.})_{экр.} = a_{кр.} \times \sqrt{4/\pi}, \tag{32}$$

где  $a_{кр.}$  – определяющий размер кристаллизатора, м

$$(l_{опр.})_{экр.} = 0,550 \times \sqrt{4/\pi} = 0,620 \text{ м}$$

Все симплексы, а также удельное сопротивление шлака найдены согласно [7].

Тогда согласно формуле (30):

$$R_{шл.} = \frac{1,13 \times 0,40 \times 0,92 \times 1,3 \times 4}{0,620} = 3,487 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Определение электрических параметров

$$P_{шл.} = I_{шл.}^2 \times R_{шл.}, \tag{33}$$

где  $I_{шл.}$  – рабочий ток печи, кА;

$P_{шл.}$  – мощность теплогенерации в шлаковой ванне, кВт;

$R_{шл.}$  – сопротивление шлака, Ом·м.

Согласно формуле (34):

$$I_{шл.} = \sqrt{P_{шл.}/R_{шл.}}, \tag{34}$$

$$I_{шл.} = \sqrt{812,441/3,487} = 15,264 \text{ кА}$$

Тогда напряжение на шлаковой ванне:

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		54

$$U_{\text{шл.}} = I_{\text{шл.}} \times R_{\text{шл.}}, \quad (35)$$

$$U_{\text{шл.}} = 3,487 \times 15,264 = 53,225 \text{ В}$$

На промышленных печах ЭШП при силе тока  $I_{\text{шл.}} = 10 \dots 60$  кА напряжение  $U_{\text{шл.}}$  составляет 40...60 В в зависимости от электрического сопротивления  $R_{\text{шл.}}$ .

Расчёт активного сопротивления расходуемого электрода

$$R_{\text{эд.}} = \frac{k_{\text{П}} \times k_{\text{Б}} \times \rho_{\text{эд.}} \times l_{\text{эд.}}}{S_{\text{эд.}}} + R_{\text{к}}, \quad (36)$$

где  $k_{\text{П}}$  – коэффициент, учитывающий поверхностное вытеснение тока;

$k_{\text{Б}}$  – коэффициент, учитывающий близость расходуемых электродов;

$\rho_{\text{эд.}}$  – удельное сопротивление электрода, Ом·м;

$l_{\text{эд.}}$  – длина электрода, м;

$R_{\text{к}}$  – контактное сопротивление, Ом·м.

При расчёте активного сопротивления  $R_{\text{к}}$  не учитываем.

Для определения всех необходимых параметров, которые необходимы для расчёта активного сопротивления, нужно знать среднюю температуру электрода.

$T_{\text{эд.}}$  при  $l_{\text{эд.}} = 2,600$  м и  $l_{\text{эд.ф.}} = 1,550$  м:

$$T_{\text{эд.}} = 208 \times (l_{\text{эд.}} / l_{\text{эд.ф.}}) \times [1 - e^{-3,6 \times l_{\text{эд.}} / l_{\text{эд.ф.}}}], \quad (37)$$

где  $l_{\text{эд.}}$  – длина электрода, м;

$l_{\text{эд.ф.}}$  – фактическая длина электрода, м.

Тогда согласно формуле (37), при  $l_{\text{эд.}} = l_{\text{эд.ф.}}$

$$T_{\text{эд.}} = 208 \times (2,600 / 2,600) \times [1 - e^{-3,6 \times 2,600 / 2,600}] = 202,317^\circ \text{С}$$

$$T_{\text{эд.}} = 202,317 + 273 = 475,317 \text{ К}$$

При  $l_{\text{эд.ф.}} = 1,550$  м, согласно формуле (37):

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		55

$$T_{\text{эд}} = 208 \times (2,600/1,550) \times [1 - e^{-3,6 \times 2,600/1,550}] = 348,071^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{эд}} = 621,071\text{K}$$

Согласно полученным температурам найдём удельное электрическое сопротивление электрода.

При  $T_{\text{эд}} = 475,317\text{K}$   $\rho_{\text{эд}} = 0,284 \times 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ; а при  $T_{\text{эд}} = 621,071\text{K}$ ,  $\rho_{\text{эд}}$  составляет  $0,392 \times 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

Относительная магнитная проницаемость материала электрода равна:

$$[(\mu_r)_{\text{эд}}]_{\text{ср.}} = 5,1 \times 10^5 \times [I_{\text{шл.}} / \Pi_{\text{эд}}]^{-0,9}, \quad (38)$$

где  $\Pi_{\text{эд}}$  – периметр поперечного сечения электрода, м.

Тогда согласно формуле (38):

$$[(\mu_r)_{\text{эд}}]_{\text{ср.}} = 5,1 \times 10^5 \times [15,264 \times 10^3 / (0,450 + 0,450)]^{-0,9} = 79,632$$

Эквивалентная глубина проникновения переменного магнитного поля в материал электрода составляет:

$$\delta_{\text{эд}} = 70,7 \times \sqrt{\rho_{\text{эд}} / [(\mu_r)_{\text{ср.}}]}, \quad (39)$$

Согласно формуле (39) при  $T_{\text{эд}} = 475,317\text{K}$

$$\delta_{\text{эд}} = 70,7 \times \sqrt{0,284 \times 10^{-6} / 79,632} = 0,0042$$

При  $T_{\text{эд}} = 621,071\text{K}$

$$\delta_{\text{эд}} = 70,7 \times \sqrt{0,392 \times 10^{-6} / 79,632} = 0,0050$$

В результате экстраполяции данных, при  $T_{\text{эд}} = 475,317\text{K}$  для симплекса

$$\frac{\sqrt{\Delta a}}{\delta_{\text{эд}}} = \frac{\sqrt{0,450 \times 0,450}}{0,0042} = 107,143 \quad \text{и} \quad \text{при} \quad T_{\text{эд}} = 621,071\text{K}$$

$$\frac{\sqrt{\Delta a}}{\delta_{\text{эд}}} = \frac{\sqrt{0,450 \times 0,450}}{0,0050} = 90,000 \quad \text{и} \quad \text{соотношения} \quad \frac{a_{\text{эд.}}}{a_{\text{эд.}}} = 1,0, \quad \text{определяем}$$

поправочные коэффициенты  $k_{\text{II}} = 14,56$ .

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		56

Коэффициенты определялись согласно [7]. Принимаем  $k_B = 1,3$  [7].

Тогда согласно формуле (36) при  $T_{эд} = 475,317K$

$$R_{эд} = \frac{14,56 \times 1,3 \times 0,284 \times 10^{-6} \times 2,600}{(0,450 \times 0,450)} = 0,00007 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Аналогично при  $T_{эд} = 621,071K$   $R_{эд} = 0,00005 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

Определение индуктивного сопротивления

$$X = \omega \times L = 2 \times \pi \times f \times L, \quad (40)$$

где  $L$  – суммарная индуктивность проводника, Гн;

$f$  – частота тока, Гц.

$$L = L_C + L_B + \sum_{k=1}^N (n \times \cos \Psi \cos i_k), \quad (41)$$

где  $L_C$  – собственная индуктивность, Гн;

$L_B$  – внутренняя индуктивность, Гн;

$M_{ik}$  – взаимная индуктивность между проводниками различных фаз, Гн;

$n$  – коэффициент, характеризующий соотношение модулей тока протекающих по  $i$ -тому и  $k$ -тому проводникам; для монофилярной установки  $n = 1$ ;

$\Psi$  – угол сдвига векторов токов по фазе.

Для параллельных проводников с синхронными токами т.е.  $\Psi = 0$ , а  $\cos \pi = 1$ .

Для монофилярной установки:

$$L_C = 2 \times l \times (\ln[(2 \times l)/(2 \times a_{эд})] + 0,5) \times 10^{-7}, \quad (42)$$

где  $l$  – фактическая длина электрода, м.

При  $l = 2,600$  м согласно формуле (42):

$$L_C = 2 \times 2,600 \times [\ln[(2 \times 2,600)/(2 \times 0,450)] + 0,5] \times 10^{-7} = 19,477 \times 10^{-7} \text{ Гн}$$

При  $l = 1,550$  м

$$L_C = 2 \times 1,550 \times (\ln[(2 \times 1,550)/(2 \times 0,450)] + 0,5) \times 10^{-7} = 5,384 \times 10^{-7} \text{ Гн}$$

Взаимная индуктивность расходуемых электродов:

$$M = 2 \times l \times [\ln(2 \times l/g) - 1] \times 10^{-7}, \quad (43)$$

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		57

где  $l$  – фактическая длина электрода, м;

$g$  – среднее геометрическое расстояние между площадями поперечных сечений расходуемых электродов, м.

Находим симплекс  $g/b = 0,65$ , из которого определяем  $g = 0,65 \times 0,4 = 0,26$  м.

При  $l = 2,600$  м согласно формуле (43):

$$M = 2 \times 2,600 \times [\ln(2 \times 2,600/0,26) - 1] \times 10^{-7} = 10,377 \times 10^{-7} \text{ Гн}$$

При  $l = 1,550$  м аналогично  $M = 3,548 \times 10^{-7} \text{ Гн}$ .

Внутренняя индуктивность ферромагнитного электрода:

$$L_B = 1338 \times 10^{-7} \times \sqrt{[(\mu_r)]_{\text{ср.}} \times \rho_{\text{эд.}} / f \times l_{\text{эд.}} / (2 \times a_{\text{эд.}})}, \quad (44)$$

где  $l_{\text{эд.}}$  – фактическая длина электрода, м.

При  $l = 2,600$  м согласно формуле (44):

$$L_B = 1338 \times 10^{-7} \times \sqrt{79,632 \times 0,284 \times 10^{-6} / 50 \times 2,600 / (2 \times 0,450)} = 2,600 \times 10^{-7} \text{ Гн}$$

При  $l = 1,550$  м аналогичным образом  $L_B = 8,092 \times 10^{-7} \text{ Гн}$ .

Тогда согласно формулам (40) и (41) при  $l = 2,600$  м

$$X = 2 \times \pi \times 50 \times (19,477 + 2,600 - 10,377) \times 10^{-7} = 0,00037 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

А при  $l = 1,550$  м  $X = 0,00031 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

Определение вторичного напряжения

Рабочая ступень вторичного напряжения:

$$U_2 = I_{\text{шл.}} \times Z, \quad (45)$$

где  $Z$  – полное электрическое сопротивление печи, Ом·м;

$$Z = \sqrt{(R_{\text{шл.}} + R)^2 + X^2} \quad (46)$$

При  $l = 2,2600$  м согласно формулам (45) и (46)

$$Z = \sqrt{(3,487 + 0,00007)^2 + (0,00037)^2} = 3,487 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$U_2 = 15,264 \times 3,487 = 53,225 \text{ В}$$

При  $l_{\text{эд.}} = 1,550$  м аналогично  $Z = 3,250 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , а  $U_2 = 49,608 \text{ В}$ .

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		58

Данные для построения графика дифференцированного электрического режима ЭШП приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Данные для построения графика дифференцированного электрического режима ЭШП

№ п.п	Интервал рабочей стадии, ч	Переменные величины						
		$I_{эд}, м$	$T_{эд}, К$	$R_{эд}, Ом \cdot м$	$X_{эд}, Ом \cdot м$	$W_{у.т.}, мДж/кг$	$P_{пол}, кВт$	$P_{шп}, кВт$
1	0,000	4,150	183,800	0,00011	0,00040	0,400	227,362	812,441
2	1,715	2,600	329,557	0,00009	0,00037	0,756	180,451	805,300
3	3,430	2,075	475,314	0,00007	0,00034	0,912	110,956	797,459
4	5,145	1,550	621,071	0,00005	0,00031	1,052	83,330	785,124

Продолжение таблицы 13

№ п.п	Интервал рабочей стадии, ч	Переменные величины		
		$R_{шп}, Ом \cdot м$	$U_2, В$	$I, кА$
1	0,000	3,487	53,225	15,264
2	1,715	3,350	53,050	15,115
3	3,430	3,221	52,730	15,020
4	5,145	2,993	52,497	14,906

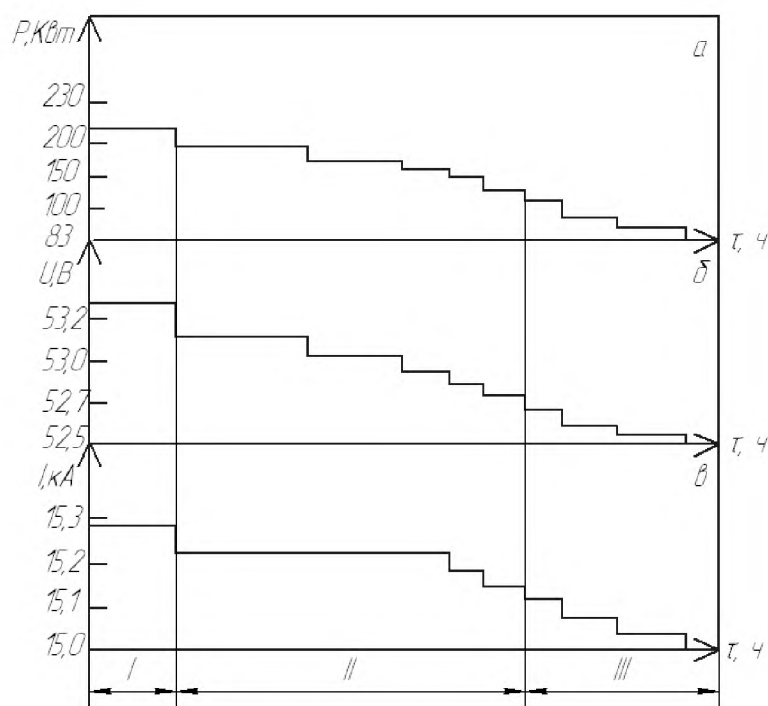


Рисунок 1 – Графики электрического режима ЭШП:

а – изменение мощности, выделяющейся в шлаковой ванне; б – изменение ступени вторичного напряжения трансформатора; в – изменение силы тока; I – период наведения шлаковой ванны; II – период установившегося процесса с заданной массовой скоростью переплава; III – период выведения усадочной раковины

#### 5.4 Материальный баланс плавки

Изменение металла по ходу ЭШП

Вес сплавляемой части электрода:

$$m_{\text{эд}} = a_{\text{эд}}^2 \cdot L_{\text{эл}} \cdot d, \quad (47)$$

$$m_{\text{эд}} = 0,450^2 \cdot 2,600 \cdot 7800 = 4105,000 \text{ кг}$$



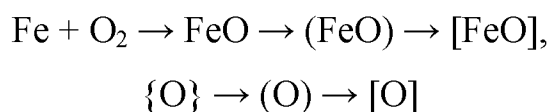
Таблица 14 – Химический состав исходного металла, %

Материал	Масса	C	Si	Mn	Cr	Mo	Al	S	P	Cu	
ГОСТ	–	0,35	0,20	0,30	1,35	0,15	0,70	н.б.	н.б.	н.б.	
		0,42	0,45	0,60	1,65	0,25	1,10	0,025	0,025	0,30	
На переплав	%	100	0,40	0,35	0,50	1,50	0,20	0,85	0,020	0,020	0,15
	кг	4105,0	16,420	14,368	20,525	61,575	8,210	34,893	0,821	0,821	6,158

При ЭШП происходит окисление (угар) элементов. Это обусловлено протеканием реакции:



то есть воздействием кислорода на легирующий элемент. Имеется 2 пути доставки кислорода к поверхности металлической ванны:



В процессе ЭШП электрод окисляется с поверхности. Каждый метр поверхности соединяет 25 грамм кислорода [10]. Количество образующейся окалины (FeO) на электроде равно:

$$m_{\text{FeO}} = 2 \cdot (72 \cdot 0,025 / 16) \cdot (2 \cdot a_{\text{эд}}) \cdot 2 \cdot L_{\text{эл}}, \quad (49)$$

где  $a_{\text{эд}}$  – стороны электрода, м;

$L_{\text{эл}}$  – длина оплавленной части, м.

$$m_{\text{FeO}} = 2 \cdot (72 \cdot 0,025 / 16) \cdot (2 \cdot 0,450) \cdot 2 \cdot 2,600 = 1,053 \text{ кг}$$

Для образования данного количества FeO потребуется кислорода из атмосферы:

$$m_{\text{O}} = 2 \cdot 0,025 \cdot (2 \cdot a_{\text{эд}}) \cdot 2 \cdot L_{\text{эл}} = 2 \cdot 0,025 \cdot (2 \cdot 0,450) \cdot 2 \cdot 2,600 = 0,234 \text{ кг}$$

Окислится железа:

$$m_{\text{Fe}} = m_{\text{FeO}} - m_{\text{O}}, \quad (50)$$

$$m_{\text{Fe}} = 1,053 - 0,234 = 0,819 \text{ кг}$$

Окалина при плавлении переходит в шлак. Конечное содержание закиси железа в шлаке составляет 0,15 %. Таким образом, в шлаке остается:

$$m_{\text{FeO}_{\text{шл}}} = 0,15 \cdot m_{\text{шл}} / 100 = 0,15 \cdot 80 / 100 = 0,120 \text{ кг}$$

Определяем количество железа, оставшегося в шлаке:

$$m_{\text{Fe}_{\text{шл}}} = m_{\text{FeO}_{\text{шл}}} \cdot 56 / 72, \quad (51)$$

$$m_{\text{Fe}_{\text{шл}}} = 0,120 \cdot 56 / 72 = 0,093 \text{ кг}$$

Совместно с железом в шлак перейдет кислорода:

$$m_{\text{O}_{\text{шл}}} = m_{\text{FeO}_{\text{шл}}} \cdot 16 / 72, \quad (52)$$

$$m_{\text{O}_{\text{шл}}} = 0,120 \cdot 16 / 72 = 0,026 \text{ кг}$$

Расчёт количества элементов, окисляющихся по ходу ЭШП:

Считаем, что содержание С и Р не изменяется в течение переплава.

Количество окислившегося элемента:

$$m_{[\text{R}]} = m_{\text{эд}} \cdot Y \cdot [\text{R}\%] / 100 \cdot 100, \quad (53)$$

где  $m_{\text{эд}}$  – масса переплавляемых электродов;

$Y$  – угар элемента;

$[\text{R}\%]$  – процентное содержание элемента.

Угар легирующих элементов в процессе плавки представлен в таблице 6.

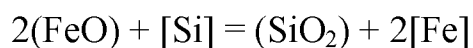
					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		62

Таблица 15 – Угары элементов

В процентах

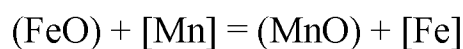
Mn	Cr	Si	Ni	S	Al	Mo
3	0,7	20	0	50	10	0

Элементы окисляются по следующим реакциям:



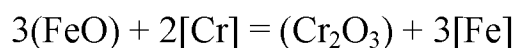
$$m_{\text{Si}} = 4105,000 \cdot 20 \cdot 0,35 / 100 \cdot 100 = 2,873 \text{ кг}$$

$$m_{\text{O}} = 2,873 \cdot 32 / 28 = 3,283 \text{ кг}$$



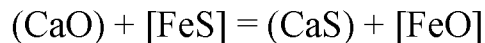
$$m_{\text{Mn}} = 4105,000 \cdot 3 \cdot 0,50 / 100 \cdot 100 = 0,616 \text{ кг}$$

$$m_{\text{O}} = 0,616 \cdot 16 / 55 = 0,180 \text{ кг}$$



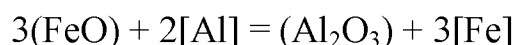
$$m_{\text{Cr}} = 4105,000 \cdot 0,7 \cdot 1,5 / 100 \cdot 100 = 0,431 \text{ кг}$$

$$m_{\text{O}} = 0,431 \cdot 48 / 104 = 0,200 \text{ кг}$$



$$m_{\text{S}} = 4105,000 \cdot 50 \cdot 0,02 / 100 \cdot 100 = 0,410 \text{ кг}$$

$$m_{\text{O}} = 0,410 \cdot 16 / 32 = 0,205 \text{ кг}$$



$$m_{\text{Al}} = 4105,000 \cdot 10 \cdot 0,85 / 100 \cdot 100 = 3,490 \text{ кг}$$

$$m_{\text{O}} = 3,490 \cdot 48 / 54 = 3,102 \text{ кг}$$

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		63

Таблица 16 – Вес слитка

В килограммах

Приход	Расход
1 Вес сплавляемой части электрода: $m_{\text{эд}} = 4105,000$	1 Окислится железа: $m_{\text{Fe}} = 0,819$ 2 Окислится кремния: $m_{\text{Si}} = 2,873$ 3 Окислится марганца: $m_{\text{Mn}} = 0,616$ 4 Окислится хрома: $m_{\text{Cr}} = 0,431$ 5 Окислится серы: $m_{\text{S}} = 0,410$ 6 Окислится серы: $m_{\text{Al}} = 3,490$
Итого: 4105,000	Итого: 8,639

Фактический вес слитка:

$$m_{\text{сл}} = 4105,000 - 8,639 = 4096,361 \text{ кг}$$

Выход годного:

$$\% = m_{\text{сл}} / m_{\text{эд}} \cdot 100, \quad (54)$$

$$\% = 4096,361 \cdot 100 \% / 4105,000 = 99,790 \%$$

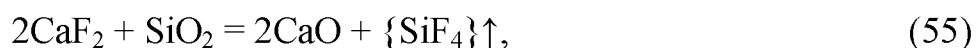
Изменение флюса в процессе электрошлакового переплава

Химический состав исходного флюса представлен в таблице 8.

Таблица 17 – Химический состав исходного флюса АНФ-6

Соединения		CaF <sub>2</sub>
%	100	100,000
кг	80	80,000

Содержание кремнезёма во флюсе в результате окисления кремния увеличится на  $m_{\text{SiO}_2}$ . По реакции  $\text{CaF}_2 - \text{SiO}_2$  протекает реакция

по которой окисляется примерно 20 %  $\text{SiO}_2$ 

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		64

$$m'_{\text{SiO}_2} = \frac{m_{\text{SiO}_2 \text{ шл.}} + m_{\text{SiO}_2}}{5} \quad (56)$$

$$m'_{\text{SiO}_2} = \frac{0,000 + 2,873}{5} = 0,575 \text{ кг}$$

где  $m_{\text{SiO}_2 \text{ шл.}}$  – количество  $\text{SiO}_2$  в исходном флюсе.

Во флюсе останется

$$\Delta m_{\text{SiO}_2 \text{ фл.}} = ((m_{\text{SiO}_2 \text{ исх. фл.}} + m_{\text{SiO}_2 \text{ уг.}}) - m'_{\text{SiO}_2}) / 5, \quad (57)$$

$$\Delta m_{\text{SiO}_2 \text{ фл.}} = ((0,000 + 2,873) - 0,575) / 5 = 0,460 \text{ кг}$$

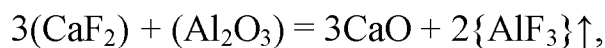
При протекании реакции расходуется:

$$m_{\text{CaF}_2} = (m_{\text{SiO}_2 \text{ исх. фл.}} + m_{\text{SiO}_2 \text{ уг.}}) \cdot 156 / 300 = (0,000 + 2,873) \cdot 156 / 300 = 1,494 \text{ кг}$$

Образуется  $\text{CaO}$ :

$$m_{\text{CaO}} = (m_{\text{SiO}_2 \text{ исх. фл.}} + m_{\text{SiO}_2 \text{ уг.}}) \cdot 112 / 300 = (0,000 + 2,873) \cdot 112 / 300 = 1,072 \text{ кг}$$

По реакции:



окисляется примерно 10 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , или:

$$m'_{\text{Al}_2\text{O}_3} = m_{\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ уг.}} / 10, \quad (58)$$

$$m'_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 3,490 / 10 = 0,349 \text{ кг}$$

Во флюсе останется:

$$\Delta m_{\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ фл.}} = m_{\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ уг.}} - m'_{\text{Al}_2\text{O}_3} \quad (59)$$

$$\Delta m_{\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ фл.}} = 3,490 - 0,349 = 3,141 \text{ кг}$$

При протекании реакции образуется  $\text{CaO}$ :

$$m_{\text{CaO}} = m'_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot 108 / 102 = 0,349 \cdot 108 / 102 = 0,370 \text{ кг}$$

При этом расходуется  $\text{CaF}_2$ :

$$m_{\text{CaF}_2} = m'_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot 234 / 102 = 0,349 \cdot 234 / 102 = 0,801 \text{ кг}$$

Поскольку другие элементы при ЭШП не улетучиваются, составляем таблицу состава конечного шлака (таблица 18).

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		65

Таблица 18 – Химический состав флюса АНФ-6 после ЭШП

Соединения		CaF <sub>2</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
%	100	93,536	1,805	0,576	0,150	3,933
кг	79,868	74,705	1,442	0,460	0,120	3,141

Химический состав стали после ЭШП представлен в таблице 19.

Таблица 19 – Химический состав стали марки 38Х2МЮА после ЭШП

Элемент		C	Si	Mn	Cr	Mo	Al	S	P	Cu
%	100	0,401	0,281	0,486	1,493	0,200	0,767	0,010	0,020	0,150
кг	4096,361	16,420	11,495	19,909	61,144	8,210	31,403	0,411	0,821	6,158

Материальный баланс всей плавки представлен в таблице 20.

Таблица 20 – Материальный баланс плавки

В килограммах

Израсходовано	Получено
1 Оплавляемая часть электрода: 4105,000	1 Шлак: 79,868
2 Флюс: 80,000	2 Слиток: 4096,361
3 Кислорода из атмосферы: 6,970	3 В виде пыли 0,234
	4 SiO <sub>2</sub> 0,460
	5 SiF <sub>4</sub> 5,304
	6 AlF <sub>3</sub> 9,217
Итого: 4191,970	Итого: 4191,444

Невязка:  $((4191,970 - 4191,444) / 4191,970) \cdot 100 = 0,012 \%$

Невязка находится в допустимых пределах.

## 6 ТРЕБОВАНИЯ К ДАЛЬНЕЙШЕМУ ПЕРЕДЕЛУ

После электрошлакового переплава стали марки 38Х2МЮА-Ш металл поступает в прокатных цех и прокатывается на профилеразмер 110...165 мм. Нагрев слитков в трёхзонных методических печах без применения специального высокотемпературного нагрева должен производиться при следующих условиях: температура у окна посадки металла в печи не более 800°C, температура в камере выдачи – 1180...1220 °С. Металл, имеющий более низкую технологическую температуру нагрева, чем находящийся в печи впереди его, должен проталкиваться в камеру выдачи только после снижения имеющейся температуры до технологической температуры нагрева проталкиваемого металла. Металл перед выдачей из печи должен быть прогрет равномерно по сечению и длине. С этой целью в камере выдачи печи слитки и заготовки должны кантоваться не менее 2-х раз и раздвигаться. Минимальная продолжительность нагрева слитков должна составлять для выбранного профилеразмера не менее 4 часов.

Продолжительность выдержки в камере выдачи печи слитков при технологической температуре нагрева должна быть 1,5...3,0 часа. В случае вынужденной остановки молота продолжительностью более 2-х часов готовый к выдаче металл должен быть передан на другой молот ковки. При невозможности ковки металла на другом молоте температура в камере выдачи должна быть снижена до 1000 °С и менее [11]. Температура металла в конце ковки составляет не менее 700 °С. После поднятия температуры до технологической температуры нагрева продолжительность выдержки в камере выдачи печи должна быть сокращена в два раза от времени выдержки.

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		67

## 7 СПЕЦИАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

7.1 Поставка прутков со спецотделкой поверхности из стали марки 38ХМ, 38Х2МЮА по ГОСТ 14955-77 со следующими изменениями

Прутки изготавливают диаметром 31,8-38,3 мм мерной длиной от 3м до 8,5мм по ГОСТ 14955–77-Ш 11. Длина прутков согласовывается при принятии заказа. Местная кривизна прутков не должна превышать 1,0 мм на 1 метр длины:

1. Овальность прутков не должна превышать половины предельных отклонений по диаметру.
2. Прутки должны быть ровно обрезаны без загибов.
3. На расстоянии до 60 мм от торцов прутков допускается: следы смятых концов, искажение формы до 0,5 мм, занижение диаметра до 0,5 мм.

Химический состав, массовая доля остаточных элементов и допускаемые отклонения по химическому составу стали марки 38ХМ, 38Х2МЮА должны соответствовать ГОСТ 4543-2016.

Прутки изготавливаются с термообработкой (нормализация + отпуск), с отметкой в сертификате.

С контролем механических свойств на продольных образцах изготовленных из металла в состоянии поставки:  $\sigma_T$ ;  $\delta$ ;  $\Psi$ ; КСУ - фактические результаты заносят в сертификат; 38Х2МЮА  $\delta = 655-855$  МПА - результаты факультативны.

Макроструктура стали в соответствии с требованиями ГОСТ 4543 - 2016. Контроль макроструктуры проводят в промежуточной или передельной заготовке.

С контролем загрязненности неметаллическими включениями – не более 3,5 балла, ГОСТ 1778 - 70, метод Ш 4.

Качество поверхности прутков должно соответствовать группе Г ГОСТ 14955 - 77. Шероховатость поверхности  $R_a$  не более 3,2 мкм на базовой длине

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		68



0,8 мм. В соответствии с заказом качество поверхности прутков должно соответствовать группе В ГОСТ 14955-77, шероховатость поверхности  $R_a$  не более 1,25 мкм на базовой длине 0,8 мм, длина 4880 + 50мм

В соответствии с заказом прутки изготавливаются диаметром 31 мм с предельным отклонением 0,16мм.

С контролем величины действительного зерна не крупнее 5 номера по ГОСТ 5639-82. Пережог стали не допускается.

Правила приемки, методы испытаний, упаковка, маркировка по ГОСТ 14955-77.

Прутки со спецотделкой должны быть покрыты предохраняющей от коррозии смазкой, упакованы в полипропиленовую ткань «CORTEC PPW - 126». Отгрузка производится в тару заказчика, вывоз автотранспортом».

1. За период 2007 - 2010г. На механические свойства проконтролировано 56 позиций (партий-плавков) стали марки 38X2МЮА.

2. Требование по ударной вязкости  $\geq 50$  Дж/см<sup>2</sup> удовлетворяют 36 партиям-плавков.

3. Две последние плавки термообработанны по откорректированному режиму (температура отпуска 730 °С 8 часов) по ударной вязкости  $\geq 50$  Дж/см<sup>2</sup> выполнялись на 100 %.

Для получения ударной вязкости не менее 69 Дж/см<sup>2</sup> на прутках со специальной отделкой поверхности из стали марки 38X2МЮА в нормализованно-отпущенном состоянии будет продолжена работа, по опробованию измененного режима термообработки (увеличение продолжительности выдержки при отпуске до 12 часов). По результатам было принято решение.

Производство прутков со спецотделкой поверхности из стали 38X2МЮА с техническими требованиями ТУ РГ 140 - 99 при условии факультативности норм по механическим свойствам из-за отсутствия данных механических свойств в состоянии поставки (нормализация + отпуск) ,при длине прутков не

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		69

более 8 м и объеме заказа не менее 20 т для формирования садки печи под термообработку.

Для обеспечения требований по неметаллическим включениям предлагаем обработку стали на УВС.

## 7.2 Результаты по ударной вязкости проведенные в условиях ООО ЗМЗ

Контроль результатов по ударной вязкости представлен в таблице 21.

Таблица 21 – Результаты механических свойств

Номер плавки	Профилеразмер, мм	$\sigma_T$ , КГС/ММ <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , КГС/ММ <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
326765	Ø31,8	472	667	26,4	63,7	152
		474	665	26,8	63,6	152
326247	Ø31,8	389	767	20,0	48,0	<u>50</u>
		389	752	20,0	54,0	<u>60</u>
326245	Ø31,8	374	748	22,4	51,4	<u>54</u>
		378	733	20,4	50,8	<u>47</u>
326252	Ø31,8	419	755	21,2	55,2	69
		386	735	21,2	55,4	<u>67</u>
326250	Ø31,8	371	713	22,0	58,6	74
		377	707	22,4	59,0	76
326172	Ø31,8	396	701	20,8	47,5	53
		396	711	21,2	45,4	47
325218	Ø31,8	395	786	23,4	53,9	<u>64</u>
		395	788	22,4	53,4	<u>54</u>
326196	Ø31,8	376	755	24,0	55,9	<u>53</u>
		377	739	24,0	55,7	<u>68</u>

Продолжение таблицы 21

324881	Ø31,8	436	720	23,6	55,2	69
		434	712	22,0		
		419	712	23,2		
		417	724	22,4		
324881	Ø31,8	384	<u>616</u>	28,0	56,4	71
		403	<u>619</u>	28,4		
325210	Ø31,8	417	742	21,6	38,4	<u>42</u>
		417	743	22,0		
325190	Ø31,8	381	656	28,0	61,7	80
		409	694	27,2		
325208	Ø31,8	363	694	26,8	53,0	<u>48</u>
		366	692	24,8		
325193	Ø31,8	412	723	24,0	51,0	<u>47</u>
		419	734	23,6		
325188	Ø31,8	405	698	24,8	53,4	64
		439	731	24,0		
324242	Ø31,8	345	690	21,6	51,0	<u>54</u>
		365	740	20,0		
324251	Ø31,8	395	730	23,2	55,2	88
		380	709	23,2		
324266	Ø31,8	366	723	25,2	56,4	<u>56</u>
		403	714	24,8		
324254	Ø31,8	451	792	22,0	46,8	<u>39</u>
		431	761	23,6		
324262	Ø31,8	455	762	24,8	46,8	<u>40</u>
		429	733	22,2		
332716	Ø31,8	449	718	24,8	52,0	<u>68</u>
		452	724	25,2		
432678	Ø31,8	484	824	18,4	53,2	<u>41</u>
		493	785	16,8		
432657	Ø31,8	387	764	20,4	48,1	<u>48</u>
		381	767	20,0		
432659	Ø31,8	352	823	18,8	47,3	<u>25</u>
		381	782	17,2		
432656	Ø31,8	433	825	20,4	48,1	<u>32</u>
		378	823	20,0		

Продолжение таблицы 21

432668	Ø31,8	408	825	20,4	42,2	<u>37</u>
		348	746	23,2	42,0	<u>35</u>
432678	Ø31,8	364	738	23,2	42,0	<u>45</u>
		363	736	23,6	42,0	<u>35</u>
432584	Ø31,8	402	744	17,2	39,9	<u>55</u>
		396	730	17,6	39,4	<u>45</u>
432563	Ø31,8	377	723	20,4	36,0	<u>44</u>
		361	733	20,0	36,0	<u>44</u>
432404	Ø31,8	704	855	20,0	54,3	<u>16</u>
		697	795	20,0	51,6	<u>25</u>
432407	Ø31,8	525	803	17,6	54,1	<u>26</u>
		525	793	17,6	56,8	<u>14</u>
432410	Ø31,8	571	682	16,8	43,2	<u>54</u>
		515	677	19,6	45,7	<u>66</u>
432407	Ø31,8	362	664	24,0	45,9	<u>45</u>
		364	657	24,4	45,7	<u>58</u>
431097	Ø31,8	413	735	22,4	57,0	<u>54</u>
		364	743	23,2	59,4	<u>72</u>
431099	Ø31,8	348	697	23,6	61,8	<u>57</u>
		355	705	20,4	61,7	<u>61</u>
431095	Ø31,8	345	775	19,6	44,2	<u>47</u>
		364	765	20,8	47,7	<u>36</u>
431092	Ø31,8	341	729	23,2	61,5	<u>67</u>
		362	706	25,2	61,4	<u>62</u>
431090	Ø31,8	293	677	25,6	59,4	<u>65</u>
		362	703	25,6	58,4	<u>69</u>
430425	Ø31,8	372	743	21,6	48,1	<u>73</u>
		322	726	22,0	48,0	<u>58</u>

## Окончание таблицы 21

430449	Ø31,8	463	805	22,4	57,0	<u>58</u>
		412	765	22,0	57,0	<u>48</u>
430452	Ø31,8	380	715	26,4	51,2	<u>55</u>
		385	710	27,6	51,2	<u>53</u>
430419	Ø31,8	421	730	21,6	51,2	<u>51</u>
		412	728	22,0	51,0	<u>40</u>
430417	Ø31,8	324	656	25,2	59,2	<u>72</u>
		335	665	24,8	59,2	<u>57</u>
Требования		фактическое	655-850	фактическое		н.м.69

Статистические данные результатов контрольных испытаний механических свойств (ударная вязкость) прутков со специальной отделкой поверхности (Ø31,8 мм) из стали марки 38Х2МЮА (нормализация+отпуск) приведены в таблице 22.

Таблица 22 – Результаты ударной вязкости

Номер плавки	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
431097	<u>54</u>
	72
431099	<u>51</u>
	<u>61</u>
431095	<u>47</u>
	<u>36</u>
431092	<u>67</u>
	<u>62</u>
430090	<u>65</u>
	69
430427	73
	<u>58</u>
430449	<u>58</u>
	<u>48</u>

Продолжение таблицы 22

430419	<u>51</u> <u>40</u>
430452	<u>55</u> <u>53</u>
430417	72 <u>57</u>

Статистические данные по результатам ударной вязкости приведены в таблице 14 :  $\sigma_B \geq 655$  мПа; КСУ -  $\geq 69$  Дж/см<sup>2</sup>

Таблица 23 – Результаты ударной вязкости

Номер плавки	$\sigma_B$ , мПа	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
430425	743	48,1
	726	48,0
430449	805	57,0
	765	57,0
430452	715	51,2
	710	51,2
431092	723	61,5
	706	61,4
431095	775	44,2
	765	47,7
431099	697	61,8
	705	61,7
431090	677	59,4
	703	58,4
430419	730	51,2
	728	51,0
432404	855	54,3
	795	51,6

После получения данных была произведена термообработка:

- термообработку проводить в печах со стационарным подом по режиму: нагрев до 920 - 940 °С, выдержка 3 - 4 часа, охлаждение - на воздухе под вентилятором.
- отобрать образцы для контроля структуры и механических свойств (6 шт.).

– не позднее, чем через 24 часа, провести отпуск по режиму: нагрев до 640-660 °С, выдержка 8 часов, охлаждение – на воздухе под вентилятором. Масса пакетов по рядам садки не должна превышать: 1 - 2 ряд – 1т; 3 - 4 ряд – 1,5 т.

На основании вышеизложенного и подготовленных статистических данных результатов контроля механических свойств стали марки 38Х2МЮА поставляемой нормализовано-отпущенном состоянии с установленной нормой по ударной вязкости без факультативности с откорректированным режимом обработки.

После корректировки технологии нормы контроля ударной вязкости получены в пределах КСУ 25 - 79 Дж/см<sup>2</sup>.

Нестабильность результатов объясняется термообработкой металла садкой и неравномерным охлаждением пакета.

Металл назначить на обточку только после получения положительных результатов контроля механических свойств и величины зерна.

Получение величины ударной вязкости КСУ -  $\geq 69$  Дж/см<sup>2</sup> возможно при термообработки металла поштучно.

Термообработку проводить в печах со стационарным подом.

Масса пакетов по рядам не должна садки не должна превышать 1 - 2 ряд 1,0 т., 3 - 4 ряд - 1,5 т.

Термообработку проводить по режиму: нагрев до 850 °С, выдержка 4 - 5 часов, охлаждение на воздухе под вентилятором. Не позднее 24 часов провести отпуск по режиму: нагрев до 650 – 660 °С, выдержка 7 - 8 часов, охлаждение под вентилятором.

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		75

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной квалификационной работе рассмотрены особенности релаксационностойкой, жаропрочной, доэвтектоидной стали марки 38Х2МЮА, произведена технология выплавки, внепечной обработки и разливки стали марки 38Х2МЮА-Ш, рассчитан материальный баланс стали 38Х2МЮА-Ш. Разработана технология электрошлакового переплава стали марки 38Х2МЮА-Ш, произведен выбор оборудования и расчет технологических параметров стали марки 38Х2МЮА и предоставлены требования к дальнейшему переделу. В специальной части рассмотрены вопросы по улучшению ударной вязкости стали марки 38Х2МЮА-Ш.

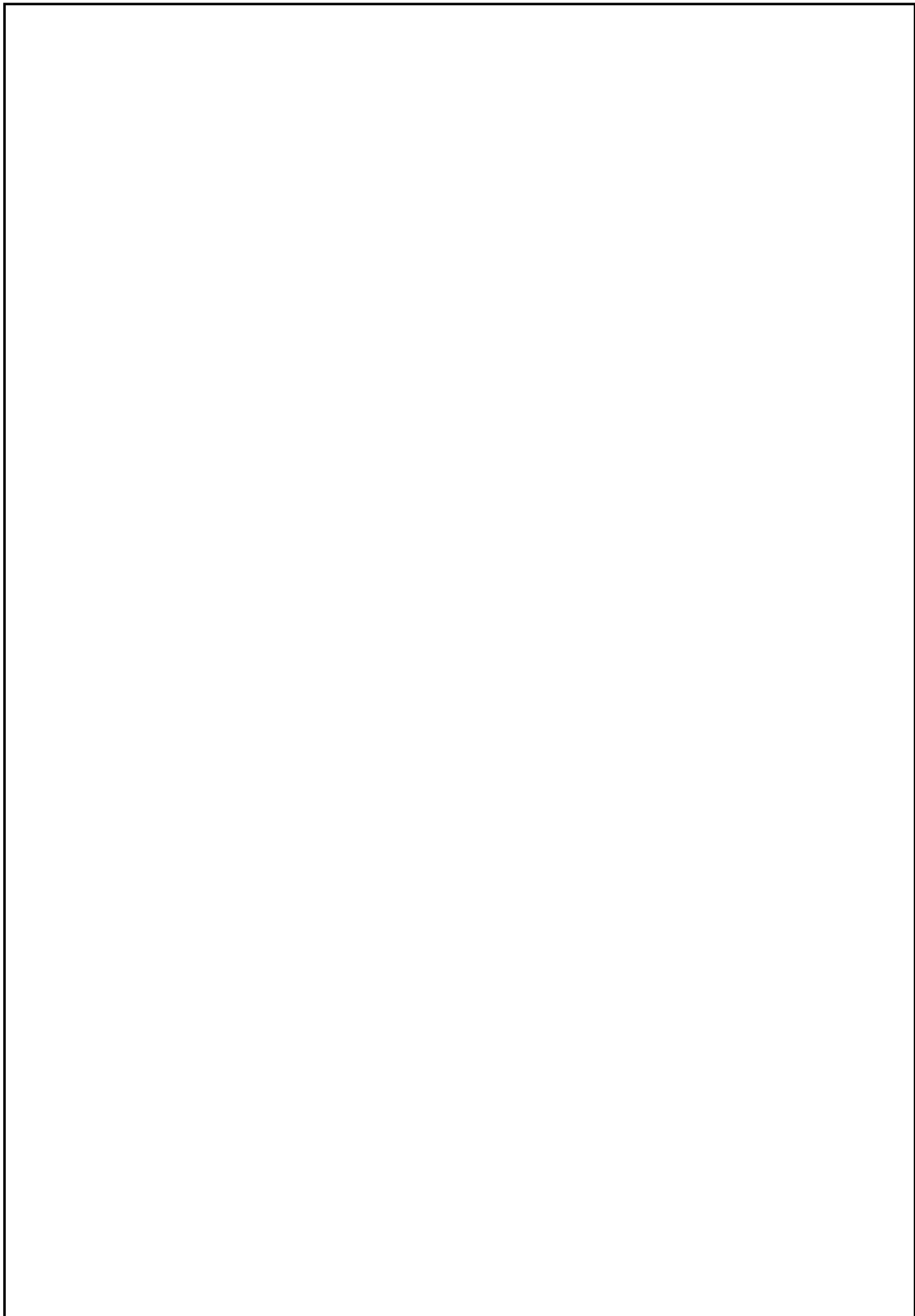
					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		76



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Латаш, Ю.В., Медовар, Б.И. Электрошлаковый переплав / Ю.В. Латаш. – М.: «Металлургия», 1970. – 206 с.
- 2 Штейнберг, С.С. Металловедение / Штейнберг С.С. – М.: «Металлургиздат», 1934. – 260 с.
- 3 Медовар, Б.И., Латаш, Ю.В. Электрошлаковый переплав / Б.И. Медовар. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 170 с.
- 4 Патон, Б.Е. Медовар, Б.И. Электрошлаковый металл / Б.Е. Патон. – Киев: «Наукова думка», 1981. – 680 с.
- 5 Поволоцкий Д.Я., Гуддим А.В. Производство нержавеющей стали. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 1996 – 336 с.
- 6 Технологические инструкции ЭШП АО ЗЭМЗ.
- 7 Егоров, А.В. Расчёт мощности и параметров электроплавильных печей / А.В. Егоров – М.: Metallurgiya, 1993. – 320 с.
- 8 Чуманов, В.И. Технология электрошлакового переплава / В.И. Чуманов. – М.: Челябинск, 1999. – 243 с.
- 9 Вачугов, Г.А. Расчёт электрошлаковых установок для производства сталей и сплавов / Г.А. Вачугов. – Учебное пособие. – М.: Челябинск, 1982. – 81 с.
- 10 Технологическая инструкция «Передел металла в молотовом отделении АО ЗЭМЗ –ТОД–004, 2005.
- 11 Технологическая инструкция. Выплавка стали и сплавов в основных дуговых электропечах.–Златоуст, 2010г.
- 12 Кудрин В.А. Теория и технология производства стали, учебник для вузов по специальности «Металлургия черных металлов» 2003 – 527с.
- 13 Поволоцкий Д.Я. , Рошин В.Е., Рысс М.А., Строганов А.И., Ярцев М.А. Электрометаллургия стали и ферросплавов. – Учебник для вузов. Изд. 2–е, переработ. и доп. – М.: Metallurgiya, 1984 – 568 с.

					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		77



					22.03.02.2021.306.00.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		78