

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева

Горно-металлургический институт имени О.А. Байконурова

Кафедра металлургических процессов, теплотехники и технологии  
специальных материалов

Темірхан Солтанбек Ғалымұлы

Изучение структурных свойств феррохрома Аксуского завода ферросплавов

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

специальность 5В070900 – Металлургия

Алматы 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева


Горно-металлургический институт имени О.А. Байконурова

Кафедра металлургических процессов, теплотехники и технологии  
специальных материалов

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**

Заведующая кафедрой МПТиТСМ

Ассоц. проф., к. т. н., доктор PhD

 Чепуштанова Т. А.

«30» апреля 2019 г.

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

На тему: "Изучение структурных свойств феррохрома Аксуского завода  
ферросплавов"

по специальности 5В070900 – Металлургия

Выполнил

Темірхан С. Ғ.

Научный руководитель

Ассоц. проф., к. т. н., доктор PhD

 Чепуштанова Т.А.

«30» апреля 2019 г.



Алматы 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева

Горно-металлургический институт имени О.А. Байконурова

Кафедра металлургических процессов, теплотехники и технологии  
специальных материалов



УТВЕРЖДАЮ

Заведующая кафедрой МПТ и ТСМ

Асс. проф., к. т. н., доктор PhD

Челупшанова Т. А.

«8» октября 2018 г.

### ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающемуся Темірхан Солтанбек Галымұлы

Тема: Изучение структурных свойств феррохрома Аксуского завода ферросплавов.

Утверждена приказом Ректора Университета №1113-б от «8» октября 2018г.

Срок сдачи законченной работы: «2» мая 2019 г.

Исходные данные к дипломной работе: Аксуский высокоуглеродистый феррохром, феррохром марки ФХ 850 А.

Краткое содержание дипломной работы:

а) изучена термодинамика восстановления феррохрома, изучены диаграммы состояния Fe-Cr, Fe-Cr-C, Fe-Cr-Mn, Fe-Cr-O

б) изучены структурные свойства феррохрома рентгенофазовым, электронно-микроскопическим методами анализа,

в) выполнен термический анализ феррохрома марки ФХ 850 А.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)  
: представлены 15 слайдов презентации работы



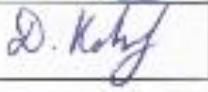
Рекомендуемая основная литература: из 21 наименований

**ГРАФИК**  
подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Введение	5.02.2019	
Литературный обзор	20.02.2019	
Экспериментальная часть	18.03.2019	
Экономическая часть	19.04.2019	
Безопасность и охрана труда	25.04.2019	
Заключение	27.04.2019	
Нормоконтроль	15.05.2019	

**Подписи**

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работы (проект) с указанием относящихся к ним разделов работы (проекта)

Наименование разделов	Консультанты И.О.Ф (уч.степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Экономическая часть	канд. техн. наук, ассоц. проф., доктор PhD Чепуштанова Т.А.	19.04.2019	
Охрана труда	канд. техн. наук, ассоц. проф., доктор PhD Чепуштанова Т.А.	25.04.2019	
Нормоконтролер	магистр техники и технологии Көккөзов Д.К.	15.05.2019	

Научный руководитель



Чепуштанова Т.А.

Задания принял к исполнению обучающийся



Темірхан С.Ғ.

Дата

« 05 » 02 2019 г.



## АНДАТПА

Дипломдық жұмыс тапсырмадан, кіріспеден, негізгі бөлімнен, қорытындыдан және пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады. Жұмыс 35 беттік компьютерлік теруден, 7 сурет, 31 кестеден тұрады. Пайдаланылған әдебиеттер тізімі 21 атаудан құралған.

Жұмыстың мақсаты: Ақсу ферроқорытпа зауытының феррохромының құрылымдық қасиеттерін зерттеу.

Зерттеу объектісі Ақсу ферроқорытпа зауытының ФХ–850А маркалы феррохром үлгісі болып табылады.

Бұл жұмыста феррохромды алудың термодинамикалық негіздемесі, фазалық тепе-теңдік диаграммалары, рентгендік-фазалық талдау нәтижелері, электронды-микроскопиялық талдау нәтижелері, термогравиметриялық зерттеулер, ФХ 850 А маркалы жоғары көміртекті феррохромды балқытудың материалдық және жылулық балансының есептеулері келтірілген.

Сонымен қатар жұмыста еңбек қауіпсіздігі мен еңбекті қорғауға қатысты жүргізілген бөлім және зерттеулердің экономикалық көрсеткіштері есептелген бөлімдері қарастырылған.

Электронды-микроскопиялық талдаумен ФХ 850 А маркалы феррохром ине тәрізді бөлшектер құрылымы бар және 30 пайыздан кем дендрит тәрізді құрылымдарды минималды қамтыған. Қасиеттердің анизотроптығы байқалады.

Термиялық талдаумен  $\gamma$ -фаза ілмегі орнатылған, яғни феррохромның құрылымдық жағдайының өзгеруіне жауап беретін температуралық, фазалық ауысу –  $\sigma$ -фазадан  $\gamma$ -фазаға өту.

## АННОТАЦИЯ

Дипломная работа состоит из задания, введения, основной части, заключения и списка использованной литературы. Работа изложена на 35 страницах компьютерного набора, включает 7 рисунков, 31 таблицу. Список использованной литературы содержит 21 наименование.

Цель работы: изучение структурных свойств феррохрома Аксуского завода ферросплавов.

Объектом исследования являлся образец феррохрома марки ФХ – 850А Аксуского завода ферросплавов.

В работе приведены термодинамическое обоснование получения феррохрома, диаграммы фазового равновесия, результаты рентгенофазового анализа, результаты электронно-микроскопического анализа, термогравиметрические исследования, расчет материального и теплового балансов выплавки высокоуглеродистого феррохрома марки ФХ – 850 А углетермическим методом, расчет теплового баланса выплавки углеродистого феррохрома.

В работе также рассмотрены разделы, касающиеся безопасности и охраны труда, рассчитаны экономические показатели проведенных исследований.

Электронно-микроскопическим анализом установлено, что феррохром марки ФХ 850 А обладает игольчатой структурой геометрии частиц, с минимальным включением дендритовидных структур менее 30 процентов, прослеживается анизотропность свойств.

Термическим анализом, установлена петля  $\gamma$ -фазы, то есть, температурный, фазовый переход отвечающий за изменение структурного состояния феррохрома – перехода из  $\sigma$ -фазы в  $\gamma$ -фазу.

## ANNOTATION

The thesis consists of a task, introduction, main part, conclusion and the list of the used literature. The work is stated on 35 pages of a computer set, includes 7 drawings, 31 tables. The list the used literature contains 21 names.

Objective: to study the structural properties of the ferrochrome of the Aksu ferroalloy plant.

The object of the study was a sample of ferrochrome brand FCH-850A Aksu ferroalloys plant.

The paper presents the thermodynamic justification of ferrochrome, phase equilibrium diagram, the results of x-ray phase analysis, the results of electron microscopic analysis, thermogravimetric studies, calculation of material and thermal balances of smelting high-carbon ferrochrome brand FX 850 A by carbon thermal method, calculation of the thermal balance of carbon ferrochrome smelting.

The work also discusses the sections related to safety and health, calculated economic indicators of the research.

Electron microscopic analysis found that ferrochromium brand FKH 850 And has halcinonide structure of the geometry of the particles, with a minimum switching dendriticum structures less than 30 percent, can be traced to the anisotropy of properties.

Thermal analysis, a loop of  $\gamma$  - phase, that is the temperature of the phase transition responsible for the change of the structure of ferrochromium transition of the  $\sigma$ -phase in the  $\gamma$ -phase.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	9
1	Критический анализ	11
1.1	Мировое производство	11
1.2	Цены	11
1.3	Аксуский завод ферросплавов	12
2	Термодинамическое обоснование получения феррохрома и системы Fe-Cr	13
2.1	Эндотермические реакции	13
2.2	Экзотермические реакции	15
2.3	Основные реакции восстановления хрома из оксидов углеродом	16
2.4	Диаграммы фазового равновесия	17
3	Определение структурных свойств феррохрома	18
3.1	Исходный состав	18
3.2	Результаты рентгенофазового анализа ФХ 850 А	18
3.3	Результаты электронно-микроскопического анализа	18
3.4	Термогравиметрические исследования феррохрома ФХ 850 А	20
4	Технологическая часть	22
4.1	Расчет материального и теплового балансов выплавки высокоуглеродистого феррохрома марки ФХ 850 А углетермическим методом	22
4.1.1	Исходные данные	22
4.1.2	Расчет материального баланса выплавки высокоуглеродистого феррохрома	23
4.1.3	Материальный баланс	24
4.2	Расчет теплового баланса выплавки углеродистого феррохрома	24
4.3	Тепловой баланс	30
5	Технико – экономические показатели	31
6	Охрана окружающей среды	32
	Заключение	34
	Список использованной литературы	35
	Приложение А	36
	Приложение Б	40
	Приложение В	45
	Приложение Г	46
	Приложение Д	47
	Приложение Е	48
	Приложение Ж	49
	Приложение З	50
	Приложение И	53



## ВВЕДЕНИЕ

*Современное состояние отрасли.* Области промышленного применения хрома и его соединений, включая сплавы и композитные материалы, широки и разнообразны. В промышленных масштабах хром начали получать (1866-70 гг.) в виде феррохрома, восстанавливая хромовую руду углеродом. Широко используется технически чистый низкоуглеродистый алюминотермический хром, содержащий 98-99 процентов Cr (примеси: алюминий, железо, кремний, сера, азот). Находит применение также силикотермический хром, получаемый восстановлением  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  кремнием. Хром входит в состав многих жаропрочных сплавов.

Основная область применения хрома и феррохрома – выплавка легированных и коррозионостойких сталей, хромистых бронз и чугунов специальных сплавов. Коррозионостойкие стали (особенно устойчивые против коррозии при высоких температурах) могут содержать до 30-40 процентов Cr. Добавка до 3 процентов Cr к обычным углеродистым сталям значительно повышает их механические свойства [1-2]. Стали с содержанием 5-6 процентов Cr отличаются повышенным сопротивлением коррозии. При содержании хрома более 10 процентов стали приобретают высокую коррозионную стойкость.

Анализ цен на феррохром говорит о том, что все марки феррохромов пользуются спросом и цены на них растут с достаточно высокими темпами. Основными производителями являются Индия, Россия, Китай, ЮАР и Казахстан. Казахстан занимает 2 место по производству феррохрома в мире после ЮАР.

*Цель:* изучение структурных свойств феррохрома Аксуского завода ферросплавов с целью прогнозирования свойств и качества получаемого феррохрома.

*Задачи работы:*

- Провести термодинамический анализ;
- провести рентгенофазовый анализ;
- электронно-микроскопический анализ;
- термогравиметрические исследования;
- провести расчеты материальных потоков.

*Научная новизна:* рентгенофазовым анализом установлено, межплоскостные расстояния: 1,15898; 1,23264; 1,72589; 1,89633; 1,91478; 2,11614; 2,28958 ( $10^{-12}$  м) отвечающие за образование урегулированных по составу устойчивых фаз:  $\text{Cr}_3\text{Fe}$ ,  $\text{Cr}_2\text{Fe}$ ,  $\text{CrFe}$ ,  $\text{CrFe}_2$  и  $\text{CrFe}_3$ . Установлено, что кристаллическая решетка феррохрома ФХ 850 А представляет собой тетрагональную структуру, структурные линии указывают на наличие  $\gamma$ -фазы.

Электронно-микроскопическим анализом установлено, что феррохром марки ФХ 850 А обладает игольчатовидной структурой геометрии частиц, с минимальным включением дендритовидных структур менее 30 процентов, прослеживается анизотропность свойств.

Термическим анализом, установлена петля  $\gamma$ -фазы, т.е. температурный,

фазовый переход отвечающий за изменение структурного состояния феррохрома – перехода из  $\sigma$ -фазы в  $\gamma$ -фазу. Для образца феррохрома ФХ 850 А  $\sigma$ -фаза (явление «хрупкости») была установлена при температуре 430 °С,  $\gamma$ -фазы при температуре 660 °С, низкотемпературная область объясняется содержанием хрома 65,0 процентов.

*Теоретическая основа* – анализ литературных данных, техническое задание и технологическая инструкция Аксуского завода ферросплавов.

*Методологическая основа* – рентгенофазовый, термодинамический анализы; электронно-микроскопический анализ; термогравиметрические исследования.

*Практическая база написания* – КазНИТУ имени К.И. Сатпаева, Аксуский завод ферросплавов.

*Обоснованием* для написания работы послужили исследования по улучшению качества ферросплавов Аксуского завода ферросплавов.

## 1 Критический анализ

### 1.1 Мировое производство

Таблица 1 – Динамика мирового производства феррохрома, тысяч тонн

Страна	2014	2015	2016	2017	2018	Прирост за последний год, %
ЮАР	2288,7	2271,6	2960,3	1237,5	2818,4	+128
Казахстан	629,9	755,1	819,5	907,7	928,2	+2
Китай	231,3	423,3	532	680	800	+18
Индия	311,9	468,7	527,1	611,4	634,2	+4
Россия	24,3	76,3	147,2	295	304,3	+3
Финляндия	248,2	250,5	264,5	234,9	243,4	+4
Зимбабве	290	261,1	218,1	257,3	213,5	-17
Бразилия	149,1	185,6	185,6	170,1	140,9	-17
Швеция	118,8	110,5	128,2	127,5	136,4	+7
Турция	-	24,6	25	15,5	55,9	+261

### 1.2 Цены

За период 27.03.2017 – 05.01.2019 г.г, разница между максимальной и минимальной ценой на феррохром В/У на мировом рынке, по данным Infogeo.ru, составила \$440, или 17,9 процентов.

Феррохром В/У: динамика изменения цен на мировом рынке \$

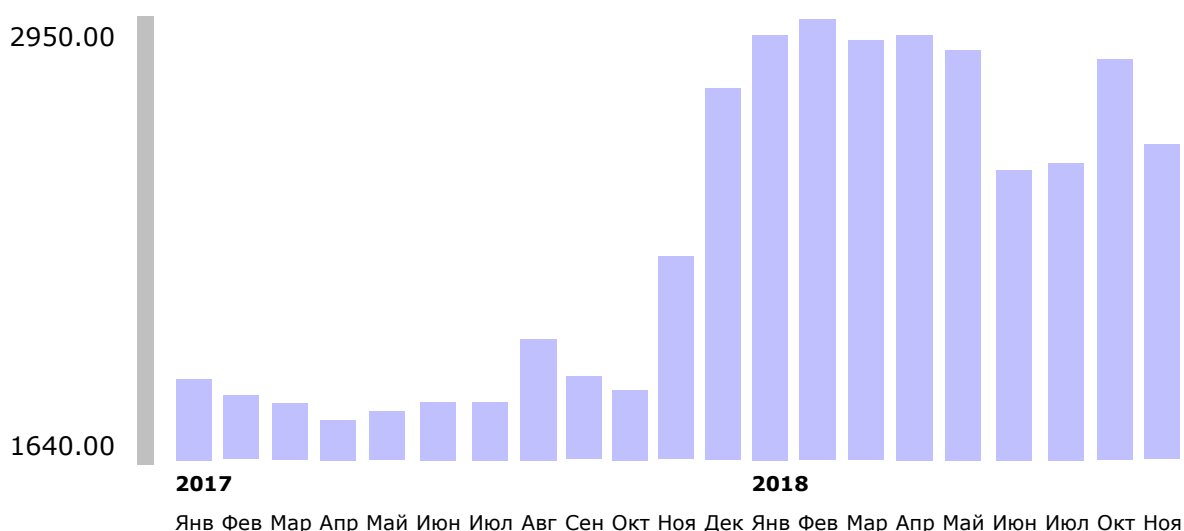


Рисунок 1 – динамика изменения цен на мировом рынке

По данным лондонского журнала Metal Bulletin, справочные цены на высокоуглеродистый феррохром в Европе повысились с \$0,97 – 1,02 до

\$1,08 –1,12 за фунт хрома, а за низкоуглеродистый подорожал с \$1,95 – 1,98 до \$2,02 – 2,04 за фунт хрома. Хромовый концентрат производства ЮАР стоит \$130 – 160 за тонну.

Европейский спотовый рынок феррохрома двинулся вверх на фоне стабильного спроса со стороны потребителей и трейдеров. Восходящий тренд преобладает на рынке с начала месяца на фоне перебоев в поставках из Турции и ЮАР, отмечают торговые источники. Высокоуглеродистый материал продается сейчас по \$1,08-1,12 за фунт хрома, включая доставку, подорожав на цент. Материал с низким содержанием фосфора стоит \$1,15 за фунт. Европейский спотовый рынок феррохрома набирал обороты на протяжении последних двух месяцев на фоне оживления спроса со стороны стального сектора. В ближайшие недели, как ожидают высказавшиеся эксперты, этот восходящий тренд сохранится [3-5].

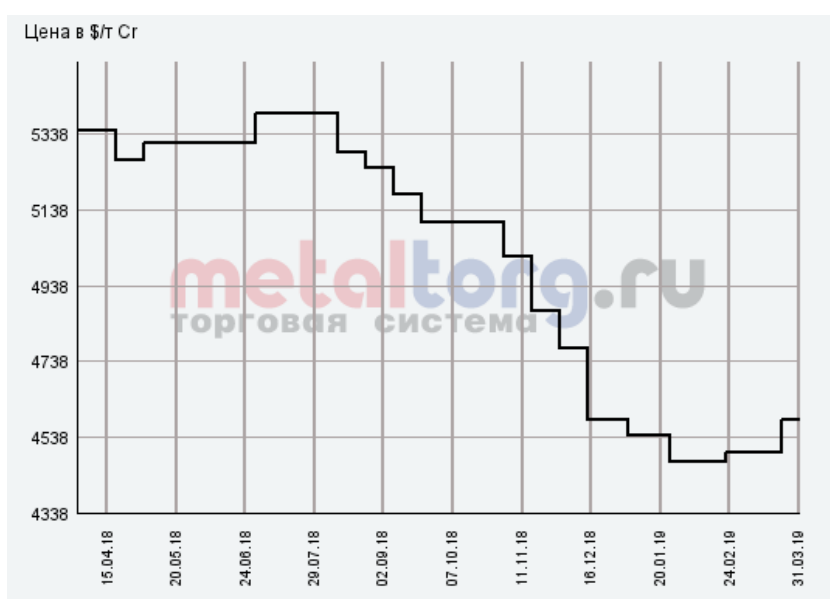


Рисунок 2 – Динамика изменения цен на феррохром в/у

### 1.3 Аксуский завод ферросплавов

На Аксуском заводе ферросплавов производство составляет свыше 1,0 млн. т в год. Марки всех выпускаемых ферросплавов соответствуют эталонам качества и имеют широкий рынок сбыта: Россия, Япония, Китай, Индия, США, страны ЕЭС. На данный момент ферросплавные металлургические предприятия России не могут обойтись без поставок из Казахстана (поставщик транснациональная компания Казхром). Следовательно, даже с учетом этого, производство ферросплавов и развитие отрасли, в условиях кризиса, будет находиться в положительной тенденции [6-8]. Однако наряду с этим есть и серьезные проблемы, которые необходимо решать: низкое извлечение ведущих элементов, уровень экологической чистоты и основные параметры плавильных агрегатов. Описание продукции и требования к материалам приведены в приложении А.

## 2 Термодинамическое обоснование получения феррохрома и системы Fe-Cr

### 2.1 Эндотермические реакции

Термодинамическим анализом с помощью программы HSC Outocumpu 5.0 проанализированы эндотермические реакции восстановления оксида хрома, оксида железа, оксида кремния, оксида фосфора. Установлено, что термодинамически возможно протекание данных реакций, таблицы 2-6. Восстановление оксида хрома возможно от 1600 °С, оксида железа 1000 °С, кремния от 2000 °С и фосфора от 1100 °С.

Таблица 2 – Термодинамика восстановления оксида хрома

$\text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{C} = 2\text{Cr} + 3\text{CO} (\text{r})$					
T, K	$\Delta H$ , кДж	$\Delta S$ , Дж/К	$\Delta G$ , кДж	K	Log(K)
1200	781.055	511.059	167.785	4.97E-08	-7.304
1300	778.648	509.131	116.778	2.03E-05	-4.693
1400	776.516	507.549	65.947	3.46E-03	-2.461
1500	774.697	506.293	15.258	2.94E-01	-0.531
1600	773.23	505.345	-35.322	1.42E+01	1.153
1700	772.154	504.691	-85.821	4.34E+02	2.637
1800	771.503	504.318	-136.269	9.01E+03	3.955
1900	771.288	504.201	-186.693	1.36E+05	5.133

Таблица 3 – Термодинамика восстановления оксида железа

$\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO} (\text{r})$					
T, K	$\Delta H$ , кДж	$\Delta S$ , Дж/К	$\Delta G$ , кДж	K	Log(K)
800	152.759	154.037	29.529	1.18E-02	-1.928
900	152.363	153.565	14.154	1.51E-01	-0.822
1000	152.561	153.767	-1.206	1.16E+00	0.063
1100	152.942	154.141	-16.613	6.15E+00	0.789
1200	153.235	154.376	-32.017	2.48E+01	1.394
1300	151.671	153.125	-47.391	8.02E+01	1.904
1400	150.102	151.962	-62.645	2.18E+02	2.337
1500	148.548	150.89	-77.787	5.12E+02	2.709
1600	147.017	149.902	-92.825	1.07E+03	3.031
1700	122.188	134.832	-107.026	1.94E+03	3.289
1800	120.582	133.914	-120.462	3.13E+03	3.496
1900	133.241	140.915	-134.499	4.99E+03	3.698

Таблица 4 – Термодинамика восстановления оксида железа

$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{C} = 2\text{Fe} + 3\text{CO} (\text{g})$					
T, K	$\Delta H$ , кДж	$\Delta S$ , Дж/К	$\Delta G$ , кДж	K	Log(K)
800	478.097	520.632	61.591	9.51E-05	-4.022
900	473.82	515.598	9.781	2.71E-01	-0.568
1000	470.654	512.215	-41.561	1.48E+02	2.171
1100	470.298	511.893	-92.784	2.55E+04	4.406
1200	470.073	511.657	-143.916	1.84E+06	6.265
1300	466.233	508.584	-194.925	6.81E+07	7.833
1400	462.472	505.796	-245.642	1.47E+09	9.166
1500	458.785	503.251	-296.093	2.05E+10	10.312
1600	455.178	500.923	-346.3	2.03E+11	11.306
1700	453.505	499.864	-396.263	1.50E+12	12.177
1800	450.496	498.143	-446.162	8.88E+12	12.948
1900	474.304	511.334	-497.231	4.69E+13	13.671

Таблица 5 – Термодинамика восстановления оксида кремния

$\text{SiO}_2 + 2\text{C} = \text{Si} + 2\text{CO} (\text{g})$					
T, K	$\Delta H$ , кДж	$\Delta S$ , Дж/К	$\Delta G$ , кДж	K	Log(K)
1400	670.658	342.444	191.236	7.32E-08	-7.136
1500	668.478	340.94	157.067	3.39E-06	-5.47
1600	666.297	339.533	123.044	9.61E-05	-4.017
1700	714.299	367.994	88.709	1.88E-03	-2.726
1800	711.903	366.625	51.978	3.10E-02	-1.508
1900	709.476	365.313	15.382	3.78E-01	-0.423
2000	697.407	359.234	-21.061	3.55E+00	0.55
2100	693.781	357.465	-56.895	2.60E+01	1.415
2200	690.145	355.773	-92.557	1.58E+02	2.198
2300	686.496	354.152	-128.052	8.10E+02	2.908
2400	682.838	352.595	-163.389	3.60E+03	3.556
2500	679.17	351.097	-198.573	1.41E+04	4.149
2600	675.49	349.654	-233.61	4.94E+04	4.694

Таблица 6 – Термодинамика восстановления оксида фосфора

$\text{P}_2\text{O}_5 + 5\text{C} = 2\text{P} + \text{CO} (\text{g})$					
T, K	$\Delta H$ , кДж	$\Delta S$ , Дж/К	$\Delta G$ , кДж	K	Log(K)
800	919.543	884.619	211.847	1.47E-14	-13.833
900	912.274	876.059	123.82	6.50E-08	-7.187
1000	904.887	868.277	36.61	1.22E-02	-1.912
1100	897.416	861.158	-49.857	2.33E+02	2.368
1200	889.893	854.612	-135.641	8.03E+05	5.905
1300	882.342	848.568	-220.796	7.46E+08	8.872



## 2.2 Экзотермические реакции

Установлено, что термодинамически возможно протекание данных реакций, таблицы 7-9. Реакция получения карбида хрома возможно от 105 °С, силиката железа 1200 °С, взаимодействия оксидов магния и алюминия от 1200 °С.

Таблица 7 – Термодинамика получения карбида хрома

7Cr + 3C = Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>					
T, К	ΔH, кДж	ΔS, Дж/К	ΔG, кДж	K	Log(K)
5	564.088	76427.95	181.948	0.00E+00	
105	-154.291	72.174	-161.869	3.41E+80	80.532
205	-161.654	15.288	-164.788	9.82E+41	41.992
305	-160.525	19.444	-166.455	3.23E+28	28.51
405	-158.114	26.25	-168.745	5.83E+21	21.766
505	-155.549	31.912	-171.665	5.72E+17	17.758
605	-153.151	36.25	-175.083	1.31E+15	15.118

Таблица 8 – Термодинамика получения силицида железа

Fe + Si = FeSi					
T, К	ΔH, кДж	ΔS, Дж/К	ΔG, кДж	K	Log(K)
1200	-86.708	-10.558	-74.039	1.67E+03	3.223
1300	-86.307	-10.237	-72.999	8.58E+02	2.933
1400	-85.816	-9.873	-71.993	4.86E+02	2.686
1600	-84.56	-9.038	-70.099	1.94E+02	2.289
1700	-64.297	3.056	-69.493	1.37E+02	2.135
1800	-62.719	3.959	-69.844	1.06E+02	2.027
1900	-75.407	-3.059	-69.594	8.19E+01	1.913

Таблица 9 – Термодинамика взаимодействия оксидов магния и алюминия

MgO + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = MgO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					
T, К	ΔH, кДж	ΔS, Дж/К	ΔG, кДж	K	Log(K)
1200	-21.092	11.275	-34.621	3.22E+01	1.507
1300	-20.328	11.885	-35.778	2.74E+01	1.438
1400	-19.36	12.601	-37.002	2.40E+01	1.381
1500	-18.178	13.416	-38.302	2.16E+01	1.334
1600	-16.776	14.32	-39.688	1.98E+01	1.296
1700	-15.146	15.307	-41.168	1.84E+01	1.265
1800	-13.286	16.37	-42.752	1.74E+01	1.241
1900	-11.194	17.5	-44.445	1.67E+01	1.222

### 2.3 Основные реакции восстановления хрома из оксидов углеродом

Установлено, что термодинамически возможно протекание данных реакций, таблицы 10-12. Восстановление оксида хрома возможно от 1500 °С, 1600 °С.

Таблица 10 – Восстановление оксида хрома

$2/3Cr_2O_3+18/7C=4/21Cr_7C_3+2CO(g)$					
T, К	$\Delta H$ , кДж	$\Delta S$ , Дж/К	$\Delta G$ , кДж	K	Log(K)
1200	492.848	349.311	73.674	6.21E-04	-3.207
1300	491.115	347.924	38.814	2.76E-02	-1.56
1400	489.423	346.67	4.085	7.04E-01	-0.152
1500	487.78	345.536	-30.524	1.16E+01	1.063
1600	486.194	344.512	-65.026	1.33E+02	2.123
1700	484.671	343.589	-99.43	1.14E+03	3.055
1800	483.215	342.756	-133.747	7.61E+03	3.882
1900	481.814	341.999	-167.984	4.16E+04	4.619

Таблица 11 – Восстановление оксида хрома

$Cr_2O_3+81/23C=2/23Cr_{23}C_6+3CO(g)$					
T, К	$\Delta H$ , кДж	$\Delta S$ , Дж/К	$\Delta G$ , кДж	K	Log(K)
1200	755.386	519.537	131.942	1.80E-06	-5.744
1300	752.697	517.384	80.098	6.05E-04	-3.219
1400	750.077	515.442	28.458	8.67E-02	-1.062
1500	747.542	513.693	-22.997	6.32E+00	0.801
1600	745.105	512.12	-74.287	2.66E+02	2.425
1700	742.782	510.711	-125.427	7.15E+03	3.854
1800	740.581	509.453	-176.434	1.32E+05	5.12
1900	738.488	508.321	-227.321	1.78E+06	6.25

Таблица 12 – Восстановление оксида хрома

$2/3Cr_2O_3+2C=4/3Cr+2CO(g)$					
T, К	$\Delta H$ , кДж	$\Delta S$ , Дж/К	$\Delta G$ , кДж	K	Log(K)
1200	520.703	340.706	111.857	1.35E-05	-4.869
1300	519.099	339.421	77.852	7.44E-04	-3.128
1400	517.677	338.366	43.965	2.29E-02	-1.64
1500	516.464	337.528	10.172	4.42E-01	-0.354
1600	515.487	336.897	-23.548	5.87E+00	0.769
1700	514.769	336.461	-57.214	5.73E+01	1.758
1800	514.336	336.212	-90.846	4.33E+02	2.637
1900	514.192	336.134	-124.462	2.64E+03	3.422

## 2.4 Диаграммы фазового равновесия

Составлены диаграммы фазового равновесия в системах Si – Cr – Fe, C – Cr – Fe, P – Cr – Fe, O – Cr – C, C – Cr – Mg при температурах 1200 °C, 1500 °C, 1900 °C.

Установлено что в системе Si – Cr – Fe устойчивыми соединениями при температурах 1200 °C, 1500 °C, 1900 °C являются Fe<sub>3</sub>Si, Fe<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, FeSi, Cr<sub>3</sub>Si, Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, CrSi, CrSi<sub>2</sub>.

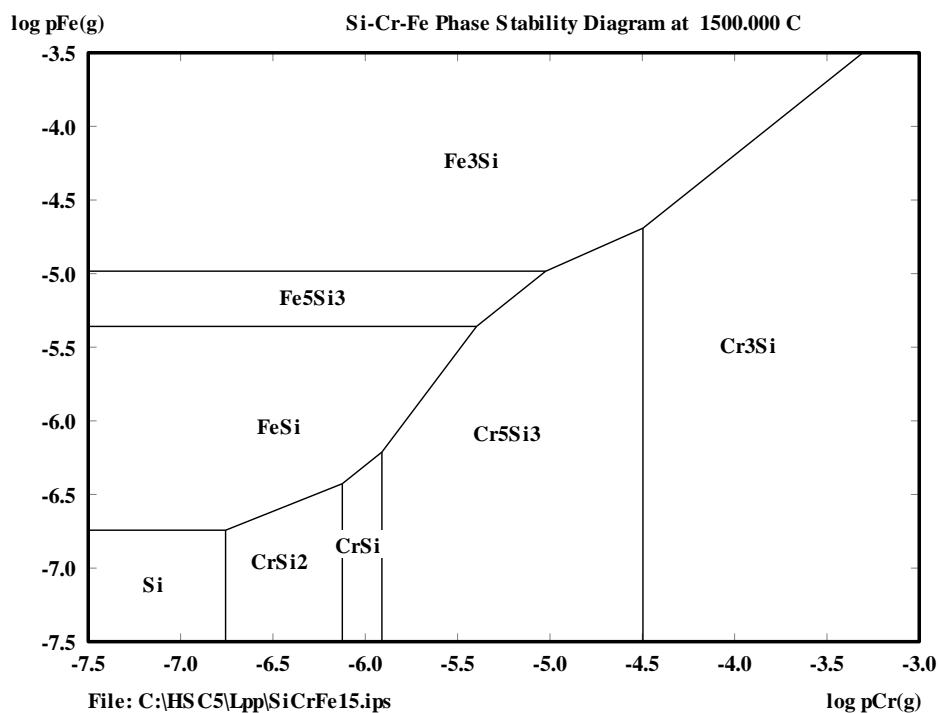


Рисунок 3 – Диаграмма фазового равновесия Si–Cr–Fe

Диаграммы фазового равновесия остальных систем приведены в приложении 3.

### 3 Определение структурных свойств феррохрома

#### 3.1 Исходный состав

Для исследований использовался Аксуский феррохром состава:

Таблица 13 – Исходный состав феррохрома ФХ 850 А

Марка	Cr, %	C	Si	P	S	Mn	Al	Fe
ФХ 850 А	65,0	8,5	2,0	0,03	0,05	0,29	0,24	21,98

#### 3.2 Результаты рентгенофазового анализа ФХ 850 А

Задачей рентгенофазового анализа было определение состава феррохрома и его структуры, рисунок 4.

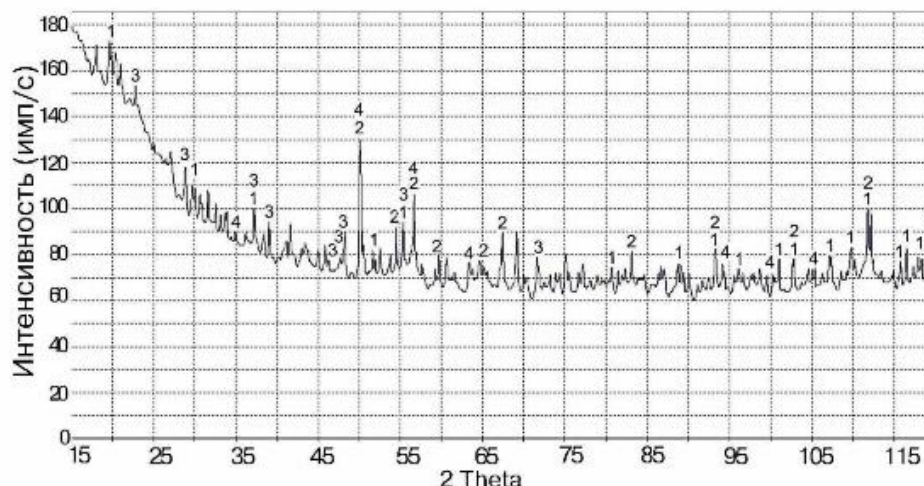


Рисунок 4 – Результаты рентгенофазового анализа ФХ 850 А

На основании анализа выявлены следующие межплоскостные расстояния: 1,15898; 1,23264; 1,72589; 1,89633; 1,91478; 2,11614; 2,28958 ( $10^{-12}$  м). Установленные структурные линии говорят об образовании урегулированных по составу фаз:  $\text{Cr}_3\text{Fe}$ ,  $\text{Cr}_2\text{Fe}$ ,  $\text{CrFe}$ ,  $\text{CrFe}_2$  и  $\text{CrFe}_3$ . Кристаллическая решетка представляет собой тетрагональную структуру. Структурные линии указывают на наличие  $\gamma$ -фазы.

#### 3.3 Результаты электронно-микроскопического анализа

Задачей электронно-микроскопического анализа было выявление геометрии частиц, их размеров и кристаллической структуры феррохрома ФХ 850 А. На микрофотографии ФХ 850 А выявлены следующие структуры образца. Анализ выполнялся на приборе GEOL.

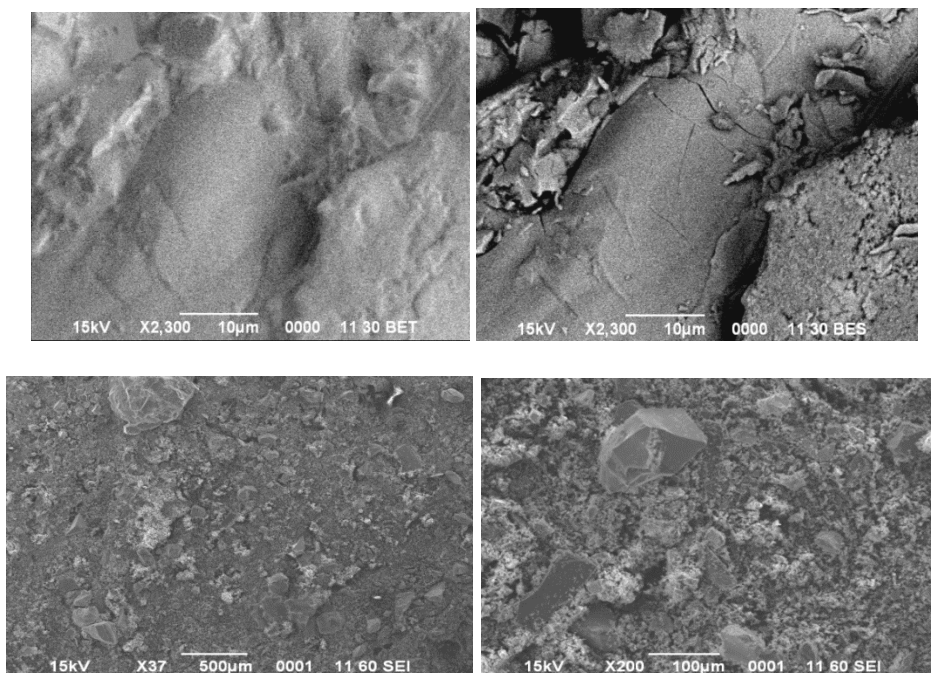


Рисунок 5 - Результаты электронно-микроскопического анализа феррохрома ФХ 850 А

Исследования показали, что феррохром марки ФХ 850 А обладает игольчатой структурой геометрии частиц, с минимальным включением дендритовидных структур менее 30 процентов, прослеживается анизотропность свойств. Фиксация трещин и пор отсутствует. Образцы гомогенизированы по составу. Выявлена плотно упакованная кристаллическая решетка. Точечный анализ выявил в структуре содержание Na, Mg, Al, Ca.

Таблица 14 – Результаты электронно-микроскопического анализа феррохрома ФХ 850 А по составу

Элемент	Масса %	Атомная масса %
С	8,22	27,50
О	1,08	5,08
Cr	77,19	57,97
Fe	13,51	9,55
Всего	100,00	100,00

Таблица 15 – Результаты электронно-микроскопического анализа феррохрома ФХ 850 А зерновой состав

Элемент	Масса %	Атомная %
С	8,37	27,53
О	2,14	5,26
Cr	75,66	57,44
Fe	13,83	9,77
Всего	100,00	100,00

Таблица 16 – Результаты точечной электронной микроскопии феррохрома ФХ 850 А

Элемент	Масса %	Атомная масса %
С	3,21	12,38
О	0,57	1,67
Na	0,02	0,03
Mg	0,05	0,09
Al	0,36	0,62
Si	0,32	0,54
Ca	0,19	0,22
Cr	87,33	77,86
Fe	7,95	6,60
Всего	100,00	100,00

### 3.4 Термогравиметрические исследования феррохрома ФХ 850 А

Термогравиметрические исследования были выполнены на приборе STA 409 PC/PG. Исходная масса составляла 110 мг, 800 °С, скорость нагрева 20 °С, атмосфера азот.

Задачей исследований стало определение фазовых переходов в структуре феррохрома ФХ 850 А, а также изучение поведения  $\gamma$ -фазы, определенной рентгенофазовым анализом, при нагреве.

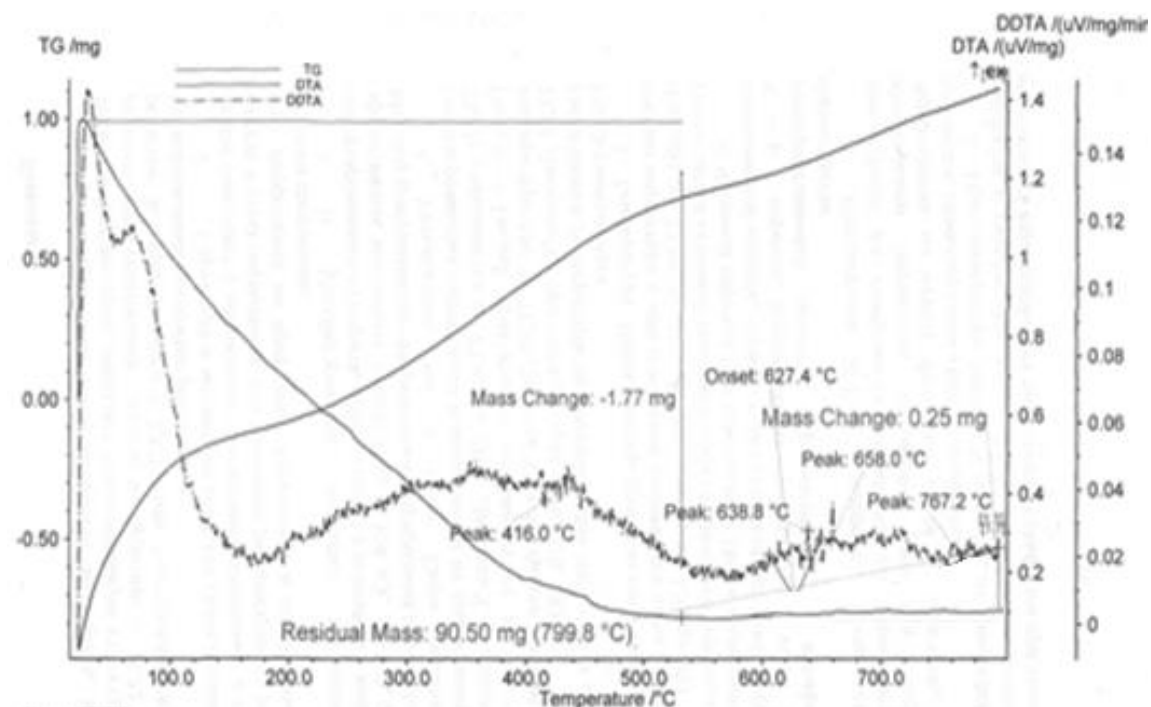


Рисунок 6 – Термогравиметрические исследования феррохрома ФХ 850 А



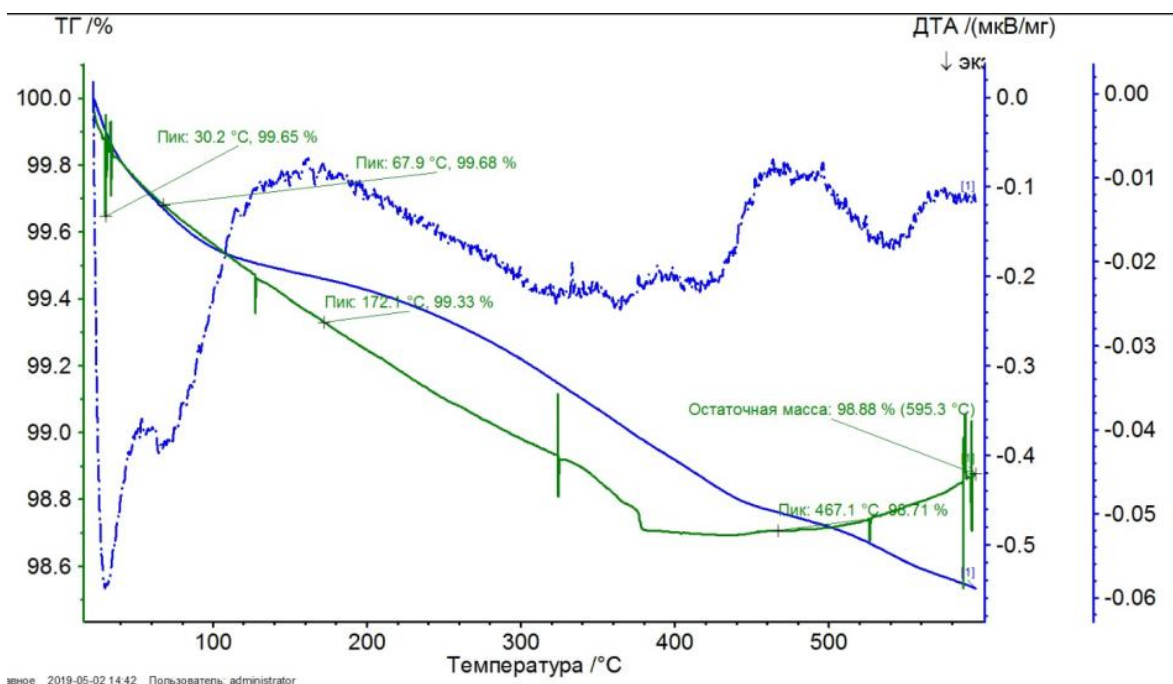


Рисунок 7 – Термогравиметрические исследования феррохрома ФХ 850 А, 600 °С

Анализ термограммы показывает, что до температуры 400 °С происходит дегидратация образца, а также удаление летучих компонентов до 510 °С, затем наблюдается стабилизация массы от 510 до 790 °С, общая потеря массы составляет 1,79 мг [9].

Определение фазовых переходов является практической задачей, так как знания о точных температурах переходов феррохрома из одной структуры в другую влияют на качество и соответствие стандарта определенных марок феррохромов. Одним из важнейших фазовых переходов является петля  $\gamma$ -фазы, то есть температурный, фазовый переход отвечающий за изменение структурного состояния феррохрома – перехода из  $\sigma$ -фазы в  $\gamma$ -фазу [10]. По разным источникам петля  $\gamma$ -фазы фиксируется от 600 °С до 800 °С, в зависимости от содержания Сг в образцах. Для образца феррохрома ФХ 850 А  $\sigma$ -фаза (явление «хрупкости») была установлена при температуре 430 °С,  $\gamma$ -фазы при температуре 660 °С, низкотемпературная область объясняется содержанием хрома 65,0 процентов. Фазовая диаграмма железо-хром также подтверждает наличие  $\gamma$ -фазы при 660 °С.

## 4 Технологическая часть

### 4.1 Расчет материального и теплового балансов выплавки высокоуглеродистого феррохрома марки ФХ–850А углетермическим методом

#### 4.1.1 Исходные данные

Расчет состава шихты выполняем на 100 кг хромовой руды. В соответствии с заданием на выполнение дипломной работы задаемся видами шихтовых материалов, их составом (таблицы 17 и 18) и условиями проведения плавки. Сумма компонентов в шихтовых материалах должна быть равна 100 процентов.

Таблица 17 – Химический состав материалов

Материал	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Mg O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> P	S	ППП	Σ
Руда хромовая ДонГОК	49,66	7,53	6,69	12,29	0,49	19,0 0	0,003	0,02 8	2,7	98,4
Окатыши хромовые обож.	50,16	7,07	7,39	12,4	0,42	18,4 9	0,002	0,01 2	1,145	97
Зола антрацита	0	54,64	26,87	13,49	1,12	3,84	0,04			100
Зола кокса КНР	0	49,5	22,8	17,9	5,38	3,48	0,94			100
Кварцит	0	96,35	0,95	0,88	0,71	0,52	0,023	0,01 2	0,555	100

Таблица 18 – Технический состав восстановителей

Материал	A <sup>C</sup>	V	W	S	C <sub>ТВ</sub>
Антрацит	4,3	5,6	0	0,16	89,94
Кокс КНР	13,67	2,19	0	0,44	83,70

Для проведения расчета необходимо знать распределение основных элементов между продуктами плавки: металл, шлак и газы, которые принимаются на основании практических данных (таблица 19). Для упрощения расчетов считаем, что электроды состоят только из углерода и полностью переходят в сплав. В условия расчёта включены также дополнительные требования к составу получаемого металла и шлака, расход электродов на расчетное количество шихты, угар восстановителя, доля различных восстановителей в смеси и другие.

Таблица 19 – Распределение элементов

Продукты плавки	Элементы							
	Si	Cr	Fe	S	P	Mg	Al	Ca
Сплав	5	94	97	10	80	0	0	0
Шлак	85	6	3	30	10	100	100	100
Улет	10	0	0	60	10	0	0	0

Дополнительные условия:

Содержание углерода в сплаве	8,3 %
Доля угля в восстановительной смеси	34 %
Коэффициент избытка восстановителя	1,09
Содержание SiO <sub>2</sub> в шлаке	30,0 %
Расход электродной массы	0,85

#### 4.1.2 Расчет материального баланса выплавки высокоуглеродистого феррохрома

Подробное описание полного расчета состава шихты, восстановителя, флюса, количества и состава металла и газов приведены в приложении Б.

Таблица 20 – Состав и количество шлака

Оксид	Вид шихты				Всего	
	руда	антрацит	кокс КНР	кварцит	кг	%
SiO <sub>2</sub>	6,205	0,124	0,748	5,85	12,927	29,17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,04	0,072	0,41	0,058	7,58	17,19
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,37	0,001	0,0095	0,053	0,91	2,09
CaO	0,455	0,03	0,096	0,043	0,624	1,33
MgO	18,745	0,01	0,062	0,031	18,85	43,23
S	2,99	0,079	0,017	0,0007	3,09	6,98
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00025	0	0,0017	0,0014	0,0034	0,007
∑	35,81	0,316	1,3342	6,03	43,97	100

Таблица 21 – Состав и количество металла

Элемент	Вид шихты			Всего	
	руда	антрацит	кокс КНР	кг	%
Cr	32,1	-	-	32,1	78,58
Si	0,17	0,003	0,017	0,19	0,465
Fe	8,35	0,022	0,178	8,55	20,93
S	0,002	0,00044	0,0047	0,0071	0,0059
P	0,001	0,000033	0,0048	0,0083	0,02
∑	40,623	0,025	0,2045	40,85	100

Таблица 22 – Состав и количество газов, пыли и улета

Газы	Вид шихты				Всего	
	руда	антрацит	кокс КНР	кварцит	кг	%
S	0,012	0,0053	0,028	0,012	0,057	0,2
SiO	0,535	0,223	0,053	-	0,811	2,86
P	0,00011	0,0096	0,0044	-	0,014	0,049
V	-	0,31	0,234	-	0,544	1,92
ППП	1,9225	-	-	0,555	2,478	8,73
O <sub>2</sub> →CO	14,27	1,15	9,06	-	24,48	86,26
Σ	16,74	1,7	9,38	0,567	28,38	100

### 4.1.3 Материальный баланс

Таблица 23 – Материальный баланс

Приход			Расход		
материал	кг	%	материал	кг	%
руда	100	81,81	металл	40,85	36,22
кокс	10,703	8,76	шлак	43,54	38,61
антрацит	5,515	4,51	газы	28,38	25,17
кварцит	6,019	4,92	невязка	-9,467	8,29
всего	122,237	100	всего	112,77	100

### 4.2 Расчет теплового баланса выплавки углеродистого феррохрома

*Физическое тепло шихты.* В нашем случае по условиям расчета не предусмотрен предварительный нагрев шихты, шихта не будет вносить дополнительное количество тепла  $Q_{\text{физ}} = 0$ .

*Экзотермическое тепло реакций.* Статья включает тепло реакций окисления  $Q_{\text{экз.ок.}}$ , тепло металлообразования  $Q_{\text{экз.мет.}}$  и тепло шлакообразования  $Q_{\text{экз.шл.}}$ . Тепло от окисления углерода восстановителей на колошнике, углерода электродов, растворения кремния и углерода в сплаве, образования силикатов и шпинелидов в шлаке рассчитывают по количеству окислившегося элемента или образовавшегося соединения  $g_i$  и соответствующему тепловому эффекту

$$Q_{\text{экз}} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot \Delta H_{fi} \quad (1)$$

1 Тепло реакций окисления  $Q_{\text{экз.ок}}$  выделяется при окислении углерода до CO по реакции  $C + 1/2O_2 = CO$  составляет 110,56 кДж/моль. Коксом, углем и электродами поступает углерода

$$13,015 \cdot 0,837 + 6,194 \cdot 0,8994 + 0,85 = 17,31 \text{ кг} \quad (2)$$

Из них 3,78 кг на науглероживание феррохрома. На восстановление расходуется углерода

$$13,2468 + 13,015 \cdot 0,00712 + 6,194 \cdot 0,00173 = 13,35 \text{ кг} \quad (3)$$

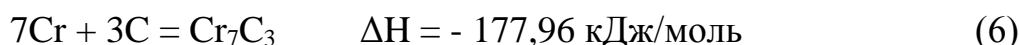
Окислится кислородом воздуха:

$$17,31 - 3,78 - 13,35 = 0,18 \text{ кг} \quad (4)$$

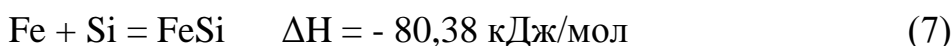
углерода. При этом образуется тепла

$$Q_{\text{экз.ок}} = 0,18 \cdot 110,56/0,012 = 173,4 \text{ кДж} \quad (5)$$

2 Тепло металлообразования  $Q_{\text{экз.мет.}}$  складывается в основном из реакций образования в сплаве карбидов и силицидов (остальным пренебрегаем). Принимаем, что весь углерод в феррохроме связан только с хромом и присутствует в виде  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ . Образование карбида хрома происходит по реакции



Также принимаем что весь кремний в феррохроме связан только с железом и присутствует в виде  $\text{FeSi}$ . Образование силицида железа происходит по реакции



При растворении 3,78 кг углерода в феррохроме выделится тепла

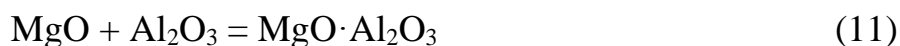
$$Q_1 = 3,78 \cdot 177,96/0,036 = 18\,686 \text{ кДж} \quad (8)$$

При растворении 0,308 кг кремния в феррохроме выделится тепла

$$Q_2 = 0,308 \cdot 80,38/0,028 = 884 \text{ кДж} \quad (9)$$

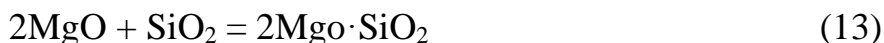
Таким образом,  $Q_{\text{экз.мет.}} = 18\,686 + 884 = 19\,569,8 \text{ кДж}$  (10)

3 Тепло шлакообразования  $Q_{\text{экз.шлак}}$  при выплавке углеродистого феррохрома складывается в основном из реакций образования в шлаке силикатов и шпинелидов магния (остальным пренебрегаем). Принимаем, что весь окись алюминия в шлаке связан только с оксидом магния и присутствует в виде шпинели  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ . Образование шпинели из оксидов происходит по реакции



$$\Delta H = - 2302,32 + 601,89 + 1676,81 = - 23,62 \text{ кДж/моль} \quad (12)$$

Также принимаем что остальная часть оксида магния в шлаке связана с кремнеземом и присутствует в виде форстерита  $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ . Образование форстерита происходит по реакции



$$\Delta H = - 2173,37 + 2 \cdot 601,89 + 911,55 = 58,04 \text{ кДж/моль} \quad (14)$$

При образовании шпинели из 7,58 кг оксида алюминия выделится тепла

$$Q_1 = 7,58 \cdot 23,62/0,102 = 1755,29 \text{ кДж} \quad (15)$$

На образование шпинели расходуется  $7,58 \cdot 40/102 = 2,97$  кг оксида магния. Остальная часть оксида магния  $18,85 - 2,97 = 15,88$  кг связывается в форстерит, при этом выделится тепла

$$Q_2 = 15,88 \cdot 58,04/0,080 = 11\,520,94 \text{ кДж} \quad (16)$$

$$Q_{\text{шл}} = 1755,29 + 11\,520,94 = 13\,276,23 \text{ кДж} \quad (17)$$

$$Q_{\text{экз}} = Q_{\text{экз.ок.}} + Q_{\text{экз.мет.}} + Q_{\text{экз.шл}} = 173 + 19\,569 + 13\,276 = 33\,018 \text{ кДж} \quad (18)$$

*Теплосодержание сплава при температуре выпуска.* Для стандартных сплавов величину теплосодержания сплава следует считать по экспериментально определенным постоянным теплофизическим величинам согласно ниже приведенной формуле

$$Q_{\text{спл.}} = G_{\text{спл.}} [(H_{T_{\text{пл}}} - H_{298}) + L_{\text{пл}} + C_{\text{ж}}(t_{\text{вып}} - t_{\text{пл}})], \quad \text{кДж} \quad (19)$$

Таблица 24 – Теплофизические свойства углеродистого феррохрома

Температура плавления $t_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	Энтальпия при $T_{\text{пл}}, H_{t_{\text{пл}}} - H_{298},$ кДж/кг	Теплота плавления, $L_{\text{пл}},$ кДж/кг	Теплоемкость жидкого $C_{\text{ж}},$ кДж/кг	Температура сплава на выпуске, $^\circ\text{C}$
1660	1150	336,5	0,767	1725-1770

Используя данные, приведенные в таблице 30, рассчитываем теплосодержание углеродистого феррохрома при температуре выпуска  $1760 ^\circ\text{C}$ .

$$Q_{\text{спл.}} = 45,679 [1150 + 336,5 + 0,767(1760-1660)] = 71\,404 \text{ кДж} \quad (20)$$



*Теплосодержание шлака при температуре выпуска.* Температура плавления шлаков выплавки углеродистого феррохрома, как и любых других, находится на 100 °С выше температуры плавления сплава, т.е. на уровне 1770 °С. Температура шлака на выпуске превышает аналогичные для сплавов на 50-80 °С, то есть находится на уровне 1830 °С [11-13]. При известных значениях удельной теплоемкостей шлака в различных температурных интервалах применяют выражения, аналогичное для сплавов:

$$Q_{\text{шл}} = G_{\text{спл}} [C_{\text{тв}} \cdot t_{\text{пл}} + L_{\text{пл}} + C_{\text{ж}} (t_{\text{вып}} - t_{\text{пл}})], \text{ кДж} \quad (21)$$

Теплосодержание шлака при отсутствии экспериментальных данных можно оценить аддитивно, но основным (трех-четырем) составляющим компонентам по справочным данным согласно нижеприведенным формулам:

$$\Delta H_{T_1}^{T_2} \text{Шл}_i = \int_{20}^{T_{\text{пл}}} C_{p-\text{тв}_i} dT + L_{\text{пл}_i} + C_{\text{ж}} (T_{\text{вып}} - T_{\text{пл}}), \text{ кДж/моль} \quad (22)$$

$$Q_{\text{шл}} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot \Delta H_{T_1}^{T_2} \text{Шл}_i \quad (23)$$

Однако температуры плавления большинства оксидов, составляющих шлак, намного выше температуры плавления самого шлака. Поэтому, строго говоря, оксиды не плавятся, образуя шлак, а растворяются [14]. Однако однотипность физических процессов лежащих в основе плавления и растворения, позволяет уравнивать изменения энтальпии в этих процессах

$$L_{\text{растворMeO}} = L_{\text{плMeO}} \cdot T_{\text{плш}} / T_{\text{плMeO}} \quad (24)$$

Таким образом, задаваясь нижеприведенными справочными данными (таблица 31), рассчитаем теплосодержание шлака при температуре 1830 °С для основных составляющих шлака (MgO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), сумма которых превышает 97 процентов от общей массы.

Таблица 25 – Теплофизические величины основных компонентов шлака и газа

Элемент	$C_p = a + bT + cT^2$ , Дж/моль·К			Энтальпия плавления, кДж/моль	Температура плавления, К	Теплоемкость в жидком состоянии, Дж/моль·К
	<i>a</i>	<i>b</i> ·10 <sup>3</sup>	<i>c</i> ·10 <sup>-5</sup>			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	114,84	12,81	-35,46	113,04	2326	144,96
SiO <sub>2</sub>	46,98	34,33	-11,3	0,63	0-848	-
	60,33	8,12	0	7,70	843-1996	85,82
MgO	42,62	7,28	-6,2	77,46	3098	84,0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	113,04	9,21	-15,66	125,0	2705	156,9
CO	28,43	4,1	-0,46	-	-	-

$$\Delta H_{298}^{2103} Al_2O_3 = \int_{298}^{2103} C_{p-тв_i} dT + L_{плш} = \int_{298}^{2103} \left( 114,84 + 0,01281T - \frac{3546000}{T^2} \right) dT + 113,04 = 326,91 \text{ кДж/моль} \quad (25)$$

$$\Delta H_{298}^{2103} SiO_2 = \int_{298}^{848} C_{p-тв_i} dT + \Delta H_{фаз} + \int_{848}^{1996} C_{p-тв_i} dT + L_{плш} + C_{ж} (T_{вып} - T_{пл}) = 125,21 \text{ кДж/моль} \quad (26)$$

$$\Delta H_{298}^{2103} MgO = \int_{298}^{2103} C_{p-тв_i} dT + L_{плш} = 141,71 \text{ кДж/моль} \quad (27)$$

$$\Delta H_{298}^{2103} Cr_2O_3 = \int_{298}^{2103} C_{p-тв_i} dT + L_{плш} = 317,09 \text{ кДж/моль} \quad (28)$$

$$Q_{шл} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot \Delta H_{T_1}^{T_2} Шл_i = 326,91 \cdot 7,58/0,102 + 125,21 \cdot 12,927/0,060 + 141,71 \cdot 18,85/0,040 + 317,09 \cdot 2,99/0,152 = 124\ 289 \text{ кДж} \quad (29)$$

*Теплосодержание газообразных продуктов.* Газы покидают печь при средней температуре 450°C. Для упрощения расчетов принимаем теплоемкости всех газообразных продуктов равными теплоемкости оксида углерода CO, основной составляющей газообразной фазы

$$Q_{газ} = G_{газ} \int_{298}^{723} C_p dT = \int_{298}^{723} \left( 28,43 + 0,0041T - \frac{46000}{T^2} \right) dT = 41,503x \times [28,43 \cdot (723-298) + 0,0041 \cdot 0,5 \cdot (723-298)^2 + 46000/(723-298)] / (1000 \cdot 0,028) = 18\ 620 \text{ кДж} \quad (30)$$

*Тепло эндотермических реакций.* Тепло на восстановление оксидов руды и золы восстановителей, диссоциацию карбонатов, испарение влаги и так далее, подсчитывают по энтальпии реакции (таблица 32) и их массе по формуле

$$Q_{энд} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot \Delta H_{fi} \quad (31)$$

Таблица 26 – Энтальпии образования оксидов

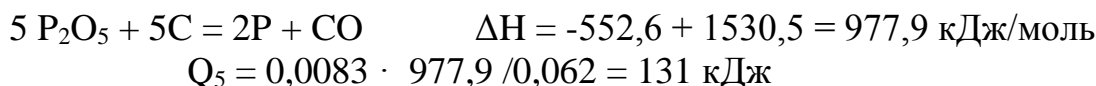
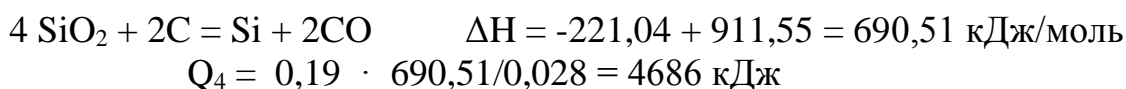
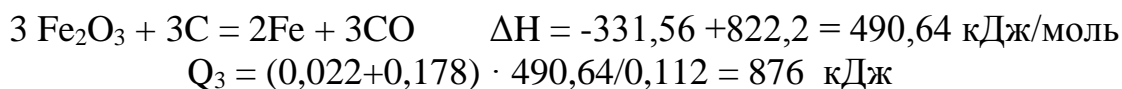
Оксид	$\Delta H_f$ , кДж/моль	Оксид	$\Delta H_f$ , кДж/моль
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-1141,32	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-1530,50
FeO	-265,44	H <sub>2</sub> O <sub>ж</sub>	-285,838
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-822,20	H <sub>2</sub> O <sub>г</sub>	-241,825
SiO <sub>2</sub>	-911,55		

$$1 \text{ Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{C} = 2\text{Cr} + 3\text{CO} \quad \Delta H = -331,56 + 1141,32 = 809,76 \text{ кДж/моль}$$

$$Q_1 = 32,1 \cdot 809,76/0,104 = 249\ 936 \text{ кДж}$$

$$2 \text{ FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO} \quad \Delta H = -110,52 + 265,44 = 154,92 \text{ кДж/моль}$$

$$Q_2 = 9,31 \cdot 154,92 / 0,056 = 25\,755 \text{ кДж}$$



$$Q_{\text{энд}} = 249\,936 + 25\,755 + 876 + 4686 + 131 = 281\,387 \text{ кДж}$$

*Потери тепла.* По экспериментальным данным тепловые потери через футеровку, излучением колошника, теплопроводностью через электроды, охлаждающей водой и т.д. при выплавке высокоуглеродистого феррохрома составляют 12,5% ( $\eta_T = 0,875$ ) от общего расхода тепла [15]. Величина тепловых потерь составит, кДж

$$Q_{\text{пот}} = (1 - \eta_T) \cdot \frac{Q_{\text{спл}} + Q_{\text{шл}} + Q_{\text{газ}} + Q_{\text{энд}}}{\eta_T} = (1 - 0,875) \frac{71404 + 124289 + 18\,620 + 281\,387}{0,875} = 70\,814 \text{ кДж} \quad (32)$$

С учетом потерь тепла сумма суммарный расход тепла составит

$$Q_{1-5} = 73404 + 124289 + 18620 + 281387 + 70\,814 = 568\,514 \text{ кДж}$$

*Определение расхода электроэнергии*

$$Q_{\text{эл.эн}} = 568\,514 - 33\,018 = 535\,496 \text{ кДж} \quad (33)$$

$$535\,496 / (0,9 \cdot 3600) = 165,28 \text{ кВт} \cdot \text{час}$$

Учитывая массу полученного сплава 40,85 кг можно определить удельный расход электроэнергии на тонну сплава:

$$W = 165,28 \cdot 1000 / 40,85 = 4046 \text{ кВт} \cdot \text{час/т} \quad (34)$$

Таблица 27 – Удельный расход электроэнергии и тепловой КПД выплавки высокоуглеродистого феррохрома

Потери тепла, %	Тепловой КПД, $\eta_T$	$W_{\text{уд}}$ , кВт·час/т
12,5	87,5	3650

### 4.3 Тепловой баланс

По результатам расчетов прихода и расхода тепла составляется тепловой баланс выплавки углеродистого феррохрома, которая приводится в таблице 28.

Таблица 28 – Тепловой баланс выплавки углеродистого феррохрома

Приход			Расход		
Статья	кДж	%	Статья	кДж	%
Физическое тепло шихты	0	0	Теплосодержание сплава	71 404	12,56
Экзотермические реакции	33 018	5,8	Теплосодержание шлака	124 289	21,86
Электроэнергия	535 496	94,2	Теплосодержание газообразных продуктов	18 620	3,28
			Эндотермические реакции	281 387	49,5
			Потери тепла	70 814	12,46
Итого	568 514	100	Итого	568 514	100

## 5 Техничко – экономические показатели

На основании рассчитанных данных получены основные технико-экономические показатели.

Таблица 29 – Техничко-экономические показатели

Показатели	Значения
Содержание Сг в ферросплаве, %	65
Капитальные затраты на оборудование, тг	680000
Затраты на исследования, тг	154000
Заработная плата и начисления, тг	110000
Срок окупаемости, лет.	3,8
Рентабельность, 10 %, тг	21500

## 6 Охрана окружающей среды

При выплавке феррохрома, проплавлении печи для подготовки к остановке на капитальный ремонт, при пуске в эксплуатацию и разогреве после капитального ремонта на производстве, минимальный уровень загрязнения окружающей среды обеспечивается при соблюдении параметров технологических процессов [16]. Перечни технологических процессов и загрязняющих веществ указаны в таблице 30.

Таблица 30 – Перечень технологических процессов и загрязняющих веществ

№ п/п	Наименование процессов	Наименование экологических аспектов и загрязняющих веществ
1	Дозирование шихтовых материалов	Загрязнение атмосферного воздуха выбросами пыли на дозаторах, пересыпках, просыпи шихты на конвейерах шихтоподачи
2	Выплавка ферросплавов (в том числе с проплавлением колошника)	Загрязнение атмосферного воздуха выбросами пыли и газов, образование шламов, получающихся при очистке газов
3	Выпуск, разливка ферросплавов	Загрязнение атмосферного воздуха выбросами газов, образование отходов и шлака
4	Дробление, отгрузка ферросплавов	Загрязнение атмосферного воздуха выбросами мелких фракций металла
5	Предпусковая подготовка печи к разогреву	Загрязнение атмосферного воздуха выбросами пыли и газов, образующихся при коксовании стартовых кожухов
6	Разогрев печи под током на коксе и шихте	Загрязнение атмосферного воздуха выбросами пыли и газов, образование шламов, образующихся в процессе разогрева печи.

Основными причинами нарушения технологического процесса выплавки высокоуглеродистого феррохрома и проплавления колошника являются:

- несоответствие шихтовых материалов по фракционному составу, прочности и влаге приводит к увеличению количества пылегазовых выбросов в атмосферу [17-20]. Поэтому необходимо строгое соблюдение требований к шихтовым материалам по содержанию мелких фракций;

- несоответствия в электродном хозяйстве (разделы ПТИ АЗФ-474901);
- попадание воды в печь;
- несоответствие рабочей длины электродов (работа на коротких электродах);
- несоответствие уровня загрузки шихтовых материалов в ванне печи;
- несоответствие электрического режима.

Порядок обращения с отходами производства определяется методологической инструкцией МИЭ АЗФ 02-4767 и МИЭ АЗФ 06-4767 по природоохранной деятельности на АЗФ.

При производстве работ по футеровке печи и разливочных ковшей минимальный уровень загрязнения окружающей среды обеспечивается при соблюдении последовательности и порядка выполнения работ в соответствии с чертежами ПКО и требованиями данной инструкции [21].

Перечни технологических процессов и загрязняющих веществ при проведении футеровочных работ указаны в таблице 31.

Таблица 31 – Перечень технологических процессов и загрязняющих веществ

№ п/п	Наименование процессов	Наименование экологических аспектов и загрязняющих веществ
1	Доставка огнеупорных, связующих и теплоизоляционных материалов к месту проведения работ	Загрязнение атмосферного воздуха и территории распылением и просыпью материалов при транспортировке
2	Выполнение работ по футеровке ванны печи и разливочных ковшей	Загрязнение атмосферного воздуха выбросами пыли и газов, образование отходов и мусора
3	Вывозка мусора и отходов	Загрязнение атмосферного воздуха и территории отходами и мусором

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рентгенофазовым анализом установлено, межплоскостные расстояния: 1,15898; 1,23264; 1,72589; 1,89633; 1,91478; 2,11614; 2,28958 ( $10^{-12}$  м) отвечающие за образование урегулированных по составу устойчивых фаз:  $\text{Cr}_3\text{Fe}$ ,  $\text{Cr}_2\text{Fe}$ ,  $\text{CrFe}$ ,  $\text{CrFe}_2$  и  $\text{CrFe}_3$ . Установлено, что кристаллическая решетка феррохрома ФХ 850 А представляет собой тетрагональную структуру, структурные линии указывают на наличие  $\gamma$ -фазы.

Электронно-микроскопическим анализом установлено, что феррохром марки ФХ 850 А обладает игольчатой структурой геометрии частиц, с минимальным включением дендритовидных структур менее 30 процентов, прослеживается анизотропность свойств.

Термическим анализом, установлена петля  $\gamma$ -фазы, то есть, температурный, фазовый переход отвечающий за изменение структурного состояния феррохрома – перехода из  $\sigma$ -фазы в  $\gamma$ -фазу. Для образца феррохрома ФХ 850 А  $\sigma$ -фаза (явление «хрупкости») была установлена при температуре 430 °С,  $\gamma$ -фазы при температуре 660 °С, низкотемпературная область объясняется содержанием хрома 65,0 процентов.

Проведен расчет материального и теплового баланса выплавки высокоуглеродистого феррохрома ФХ 850 А.

Технико-экономическая оценка работы показала, что срок окупаемости процесса составляет 3,8 лет, экономический эффект при 10 процентов рентабельности работы по результатам первого года 21500 тенге.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Чернобровин В. П., Михайлов Г.Г., Хан А. В., Строганов А.И. состояния и перспективы производства хромистых сплавов в условиях челябинского электрометаллургического комбината.
- 2 Виноградов Г.А., Радомысельский И.Д. Прессование и прокатка металлических порошков. М.: Машгиз,- 1983,- 200 с.
- 3 <http://edu.dvgups.ru/htm>.
- 4 <http://chem21.info/info/2118/>.
- 5 <https://ru.wikipedia.org/wiki/феррохром>.
- 6 Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. – Новосибирск: Наука, 1996. – 205 с.
- 7 Еднерал Ф. П. Электрометаллургия стали и ферросплавов. – 4-е изд., исп. и доп. – М.: Metallurgia, 1977.
- 8 Муканов Д. Metallurgia Казахстана: Состояние, инновационный потенциал, тренд развития. – Алматы: «Айкос», 2005. – 290 с.
9. Хансен М., Андерко К. Структура двойных сплавов. 2 том. – М.: Науч. издат. – 1962. – 1488 с.
- 10 Michael Gasic – Handbook of Ferroalloys, Theory and technology. Kidlington, Oxford, 2013.
- 11 Дурпер Р., Фолькерт Г. Metallurgia ферросплавов. – М: Metallurgia, 1976. – 480 с.
- 12 Mining J. – USA: 2006. – Volume 30: № 9.
- 13 Zweiger H. German metallurgy. - London: Oxford Press, № 2, 2000. – pp. 20-27. 6. Kauffman S.F. Thermal Investigations. New York: Oxford Press, 2000. – P. 320.
- 14 Севрюков Н. Н, Кузьмин Б.А., Челищев Е.В. Общая metallurgia. – М.: Metallurgia, 1976
- 15 Тарасов А.В., Уткин Н.И. Общая metallurgia. Учебник для вузов. – М.: Metallurgia, 1997
- 16 Поляков А.Ю., Макунин С.С. – Получения ферросплавов и чистых металлов в вакууме – Вакуумная metallurgia М.: Metallurgia, 1962
- 17 Архипов Г.И. – Минеральные ресурсы горнорудной промышленности дальнего востока. Обзор состояния и возможности развития, Москва 2011
- 18 Заморуев В.М. – Производство стали, Москва 1950
- 19 Madeleine F. Barnothy – Biological Effects of Magnetic Fields, 292
- 20 Патон Б.Е. – Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением, Москва: Машиностроения, 1974
- 21 J.R. Lampman, A.T. Peters – Ferroalloys and other additives to liquid iron and steel, American Society for testing and materials, Philadelphia 1981

## Приложение А

Многие предприятия в Казахстане работают рентабельно благодаря низким экологическим требованиям и их выбросам. Особенно вредными в ферросплавном производстве является двухвалентный марганец и шестивалентный хром, отнесенные ко второму классу опасности.

В наше время, ферросплавная отрасль остается важнейшим звеном отечественной металлургии. Будущее развитие Аксуского завода ферросплавов связывается с увеличением выпуска конкурентоспособных на мировом рынке ферросплавов, ферромарганца и кремнистых ферросплавов с дальнейшим созданием производств по выпуску высококачественных легированных сталей различного ассортимента. Наличие в Казахстане разнообразных и крупных по запасам месторождений минерального сырья служит реальной базой для производства сплавов и лигатур, развитие энергетических и производственных мощностей для его переработки и научно-технического потенциала в области металлургии стали и сплавов.

*Основные требования к шихтовым материалам.* Для выплавки высокоуглеродистого феррохрома используются следующие материалы:

- руда хромовая производства Донского ГОК - филиал АО «ТНК Казхром»;

- окатыши хромовые обожженные производства Донского ГОК – филиал АО «ТНК «Казхром»;

- хромовый офлюсованный агломерат, производимый в агломерационном цехе Аксуского завода ферросплавов;

- восстановители (орешек коксовый, кокс производства КНР, антрацит, шубаркольский спецкокс);

- флюсующие материалы (кварцитовые отходы или кремнийсодержащий шлак от производства ферросилиция и ферросиликохрома);

- отходы собственного производства (хромистые «оборотные» отходы);

- хромистый металлоконцентрат производства ЦПШЛ.

*Руда хромовая.* Подготовка хромовой руды к выплавке высокоуглеродистого феррохрома состоит из следующих этапов:

- складирование руды с учетом химического и гранулометрического состава определяется отдельным распоряжением по заводу в зависимости от качества поступающей руды;

- дробление руды и последующий рассев с целью доведения до определенного фракционного состава.

Для ведения нормального технологического процесса печи должны обеспечиваться кусковой хромовой рудой с верхним размером куска 160 мм и рядовой хромовой рудой фракции от 0 до 120 мм. Задаваемое соотношение между марками хромовой руды, дозируемой на печи, определяется старшим мастером-технологом блока печей цеха № 1.

Продолжение приложения А

Таблица А.1 – Нормы химического состава хромовых руд

№ п/п	Наименование показателей качества	Марка руды				
		ДХ-Э-10	ДХ-1-3	ДХ-1-4	ДХ-1-5	ДХ-1-6
1	Массовая доля оксида $Cr_2O_3$ , %, не менее	47	49	47	46	45
2	Массовая доля диоксида кремния, %, не более	9,5	8,0	9,7	9,5	10,5
3	Отношение массовой доли оксида хрома к закиси железа, %, не менее	3,2	3,9	3,4	3,3	3,2
4	Массовая доля фосфора, %, не более	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006
5	Массовая доля серы, %, не более	0,05	0,08	0,07	0,05	0,07

Таблица А.2 – Требования по гранулометрическому составу

Марка руды	Массовая доля класса от 0 до 10 мм, %, не более	$Cr_2O_3$ , %, не менее
ДХ-Э-10 (фр. от 0 до 10 мм)	-	47
ДХ-1-3 (фр. от 3 мм до 10 мм)	-	49
ДХ-1-4 (фр. от 10 мм до 160 мм)	30	47
ДХ-1-5 (фр. от 10 мм до 160 мм)	15	46
ДХ-1-6 (фр. от 0 до 300 мм)	50	45

*Окатыши хромовые обожженные.* По химическому составу хромовые окатыши должны соответствовать нормам, указанным в таблице А.3.

Таблица А.3 – Качественный состав окатышей

Наименование показателей	Норма	Метод испытаний
Массовая доля оксида хрома, %, не менее	50,0	ГОСТ 15848.1
Массовая доля диоксида кремния, %, не более	8,0	ГОСТ 15848.12
Массовая доля фосфора, %, не более	0,005	ГОСТ 15848.14
Массовая доля серы, %, не более	0,05	ГОСТ 15848.6
Выход класса крупности от 0 до 5 мм, %, не более	10,0	ГОСТ 27562
Диаметр окатышей, мм	от 6 до 12	ГОСТ 166
Показатель прочности на сжатие, кгс/окатыш, не менее	150	ГОСТ 24765
Содержание влаги, %, не более	0,5	ГОСТ 15054

Продолжение приложения А

*Офлюсованный хромовый агломерат*

Таблица А.4 – Требования к офлюсованному хромовому агломерату

Наименование показателей качества	Норматив
Массовая доля $Cr_2O_3$ , %, не менее	43
Гранулометрический состав, мм	от 6 (8) до 100
Массовая доля подрешетного продукта, %, не более	10
Массовая доля надрешетного продукта, %, не более	15

*Восстановитель.* Технические требования к восстановителям представлены в таблице А.5.

Таблица А.5 – Технические требования к восстановителям

№ п/п	Наименование показателей	Вид восстановителя			
		Антрацит	Кокс КНР	Коксовый орешек марок КО-1, КО-2, КО-3	Спецкокс шубаркольский
1	Зольность не более, %	16	15	13	15
2	Массовая доля рабочей влаги, % средняя	12	20	18	20
3	Массовая доля кусков размером более 25 мм, % не более	-	15	10	-
4	Массовая доля мелочи (кусков размером менее 10 мм), % не более	-	10	15	-

*Флюсующие материалы.* В качестве флюсующего материала применяются покупные кварцевые отсеvy фракции от 5 мм до 25 мм или отсеvy получаемые в процессе подготовки кварцита к производству кремнистых ферросплавов в цехе № 4, которые поступают в ОПШ-2 из ОПШ-1 фракции от 0 до 20 мм. Подготовка материалов заключается в отсеve мелочи размером менее 5 мм. В подготовленных кварцевых отсевах допускается наличие мелочи фракции менее 5 мм не более 12 %.

*Отходы собственного производства.* При выплавке высокоуглеродистого феррохрома используются хромистые «оборотные» отходы (недовосстановившаяся в печи хромовая руда и шлакометаллические

*Продолжение приложения А*

«настыли») собственного производства, качество которых должно удовлетворять требованиям стандарта СТ АО 306792590291 ф-л-4749.002.

В «оборотные» отходы входят сливы шлака из ковша перед разливкой металла, прошлакованный металл от чистки ковша и лотков разливочных машин.

*Основные требования к выпускаемой продукции.* Высокоуглеродистый феррохром – легирующий сплав железа, хрома, углерода и железа (с минимальным содержанием хрома 65,0 % по массе и максимальным – 75 % по массе), полученный восстановлением соответствующих сырых материалов или их концентратов. Поставляется для металлургической и литейной промышленности и применяется, как легирующая присадка при производстве стали и сплавов.

Таблица А.6 – Химический состав высокоуглеродистого феррохрома

Марка	Хром, %, не менее	Углерод	Кремний	Фосфор	Сера
		%, не более			
ФХ 800 А	65,0	8,0	2,0	0,03	0,06
ФХ 800 Б	65,0	8,0	2,0	0,05	0,08
ФХ 850 А	65,0	8,5	2,0	0,03	0,05
ФХ 850 Б	65,0	8,5	2,0	0,05	0,08
ФХ 900 А	65,0	9,0	2,0	0,03	0,04
ФХ 900 Б	65,0	9,0	2,0	0,05	0,06

## Приложение Б

*Расчет состава шихты.* Рассчитываем средний состав руды:

Оксид	Расчет	Количество, %
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$(49,66 \cdot 50 + 50,16 \cdot 50) / 100 =$	49,91%
SiO <sub>2</sub>	$(7,53 \cdot 50 + 7,07 \cdot 50) / 100 =$	7,3%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$(6,69 \cdot 50 + 7,39 \cdot 50) / 100 =$	7,04%
FeO	$(12,29 \cdot 50 + 12,40 \cdot 50) / 100 =$	12,345%
CaO	$(0,49 \cdot 50 + 0,42 \cdot 50) / 100 =$	0,455%
MgO	$(19 \cdot 50 + 18,49 \cdot 50) / 100 =$	18,745%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	$(0,003 \cdot 50 + 0,002 \cdot 50) / 100 =$	0,0025%
ППП	$(2,7 \cdot 50 + 1,145 \cdot 50) / 100 =$	1,9225%
$\Sigma$		97,74%

*Расчет количества восстановителя.* Для восстановления 100 кг концентрата потребуется углерода:

Реакция	Расчет	Количество С, кг
$Cr_2O_3 + 3C = 2Cr + 3CO$	$(49,91 \times 0,94) \times 36 / 152 =$	11,11
$SiO_2 + 2C = Si + 2CO$	$(7,3 \times 0,05) \times 24 / 60 =$	0,146
$FeO + C = Fe + CO$	$(12,345 \times 0,97) \times 12 / 72 =$	1,99
$P_2O_5 + 5C = 2P + 5CO$	$(0,0025 \times 0,8) \times 60 / 142 =$	0,0008
$\Sigma$		13,2468
С учетом K <sub>изб</sub>		13,421

На восстановление золы кокса КНР потребуется углерода:

Реакция	Расчет	Количество С, кг
$SiO_2 + 2C = Si + 2CO$	$13,67 \times 0,495 \times 0,05 \times 24 / 60 =$	0,135
$Fe_2O_3 + 3C = 2Fe + 3CO$	$13,67 \times 0,179 \times 0,97 \times 36 / 160 =$	0,534
$P_2O_5 + 5C = 2P + 5CO$	$13,67 \times 0,0094 \times 0,8 \times 60 / 142 =$	0,043
$\Sigma$		0,712
С учетом K <sub>изб</sub>		0,782

В коксе КНР содержится активного углерода, кг:

$$100 - 13,67 - 2,19 - 0,44 - 0,782 = 82,918 \text{ кг}$$

*Продолжение приложения Б*

На восстановление золы антрацита потребуется углерода:

Реакция	Расчет	Количество С, кг
$\text{SiO}_2 + 2\text{C} = \text{Si} + 2\text{CO}$	$4,3 \times 0,546 \times 0,05 \times 24 / 60 =$	0,0469
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{C} = 2\text{Fe} + 3\text{CO}$	$4,3 \times 0,1349 \times 0,97 \times 36 / 160 =$	0,126
$\text{P}_2\text{O}_5 + 5\text{C} = 2\text{P} + 5\text{CO}$	$4,3 \times 0,0004 \times 0,8 \times 60 / 142 =$	0,00058
$\Sigma$		0,173
С учетом $K_{\text{изб}}$		0,189

В антраците содержится активного углерода, кг:

$$100 - 4,3 - 5,6 - 0,16 - 0,189 = 89,751 \text{ кг}$$

По предварительным масса металла составляет 41,58 кг:

Элемент	Расчет	Количество, кг
Cr	$49,91 \times 0,94 \times 104 / 152 =$	32,1
Fe	$12,345 \times 0,97 \times 56 / 72 =$	9,31
Si, C, S, P (8,3 + 0,7 = 9%)	$9(32,1 + 9,31) / 91 =$	4,09
$\Sigma$		45,5

Для науглероживания 45,5 кг сплава до 8,3 % С необходимо  $45,5 \times 0,083 = 3,78$  кг углерода. С учетом расходуемой электродной массы 0,85 кг на 100 кг руды можно рассчитать общее необходимое количество углерода:

$$13,421 + 3,78 - 0,85 = 16,351 \text{ кг}$$

Рассчитывается количество сухого кокса у антрацита на 100 кг руды:

Кокс	$16,351 \times (1 - 0,34) \times 100 / 82,918 = 13,015 \text{ кг}$
Антрацит	$16,351 \times 0,34 \times 100 / 89,751 = 6,194 \text{ кг}$

*Расчет количества флюса.* Из руды в шлак перейдут следующие оксиды:

Оксид	Расчет	Масса, (кг)
$\text{SiO}_2$	$7,3 \times 0,85 =$	6,205
$\text{Al}_2\text{O}_3$	7,04	7,04
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$12,345 \times 0,03 =$	0,37
CaO	0,455	0,455
MgO	18,745	18,745
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$49,91 \times 0,06 =$	2,99
$\text{P}_2\text{O}_5$	$0,0025 \times 0,1 =$	0,00025
$\Sigma$		35,81

Продолжение приложения Б

Из антрацита в шлак перейдут следующие оксиды:

Оксид	Расчет	Масса, кг
SiO <sub>2</sub>	$6,194 \times 0,043 \times 0,5464 \times 0,85 =$	0,124
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$6,194 \times 0,043 \times 0,2687 =$	0,072
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$6,194 \times 0,043 \times 0,1349 \times 0,03 =$	0,001
CaO	$6,194 \times 0,043 \times 0,112 =$	0,03
MgO	$6,194 \times 0,043 \times 0,0384 =$	0,01
S	$6,194 \times 0,043 \times 0,3 =$	0,079
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	$6,194 \times 0,043 \times 0,0004 \times 0,1 =$	0
Σ		0,316

Из кокса в шлак перейдут следующие оксиды:

Элемент	Расчет	Итого, (кг)
SiO <sub>2</sub>	$13,015 \times 0,1367 \times 0,495 \times 0,85 =$	0,748
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$13,015 \times 0,1367 \times 0,228 =$	0,41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$13,015 \times 0,1367 \times 0,179 \times 0,03 =$	0,0095
CaO	$13,015 \times 0,1367 \times 0,0538 =$	0,096
MgO	$13,015 \times 0,1367 \times 0,0348 =$	0,062
S	$13,015 \times 0,0044 \times 0,3 =$	0,017
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	$13,015 \times 0,1367 \times 0,0094 \times 0,1 =$	0,0017
Σ		1,3342

Предварительное количество шлака составляет:

$$35,81 + 0,316 + 1,3342 = 37,46 \text{ кг}$$

Количество SiO<sub>2</sub> в шлаке:

$$6,205 + 0,124 + 0,748 = 7,077 \text{ кг}$$

или

$$7,077 / 37,46 \times 100 = 18,89 \%$$

Рассчитываем необходимое количество кварцита для достижения содержания SiO<sub>2</sub> в шлаке до 30,0 % . Масса шлака без учета SiO<sub>2</sub> составит:

$$37,46 - 7,077 = 30,383 \text{ кг}$$

Рассчитываем необходимое дополнительное количество SiO<sub>2</sub>:

$$30,383 \times 30 / 70 - 7,077 = 5,94 \text{ кг}$$



Продолжение приложения Б

Количество необходимого кварцита составит:

$$5,94/0,979 = 6,07 \text{ кг}$$

Из кварцита в шлак переходит:

Элемент	Расчет	Итого, (кг)
SiO <sub>2</sub>	$6,07 \times 0,9635 =$	5,85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$6,07 \times 0,0095 =$	0,058
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$6,07 \times 0,0088 =$	0,053
CaO	$6,07 \times 0,0071 =$	0,043
MgO	$6,07 \times 0,0052 =$	0,031
S	$6,07 \times 0,00012 =$	0,0007
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	$6,07 \times 0,00023 =$	0,0014
$\Sigma$		6,03

*Расчет количества и состава металла.* Производим конечный расчет состава металла и его массы. Из хромовой руды в состав металла перейдет, кг:

Элемент	Расчет	Итого, (кг)
Cr	$49,91 \times 0,94 \times 104/152 =$	32,1
Si	$7,3 \times 0,05 \times 28/60 =$	0,17
Fe	$12,345 \times 0,97 \times 56/72 =$	8,35
S	$0,28 \times 0,1 =$	0,002
P	$0,0025 \times 0,8 \times 62/142 =$	0,001
$\Sigma$		40,623

Из кокса КНР в состав металла перейдет, кг:

Элемент	Расчет	Итого, (кг)
Si	$10,703 \times 0,1367 \times 0,495 \times 0,05 \times 28/60 =$	0,017
Fe	$10,703 \times 0,1367 \times 0,179 \times 0,97 \times 112/160 =$	0,178
S	$10,703 \times 0,0044 \times 0,1 =$	0,0047
P	$10,703 \times 0,1367 \times 0,0094 \times 0,8 \times 62/142 =$	0,0048
$\Sigma$		0,2045

Из антрацита в состав металла перейдет, кг:

Элемент	Расчет	Итого, (кг)
Si	$5,515 \times 0,043 \times 0,5464 \times 0,05 \times 28/60 =$	0,003
Fe	$5,515 \times 0,043 \times 0,1349 \times 0,97 \times 112/160 =$	0,022
S	$5,515 \times 0,0016 \times 0,1 =$	0,00088
P	$5,515 \times 0,043 \times 0,0004 \times 0,8 \times 62/142 =$	0,000033
$\Sigma$		0,025

Продолжение приложения Б

Расчет количества и состава газов. Газы, выделяющиеся из хромовой руды, кг:

S	$0,02 \times 0,6 =$	0,012
SiO	$7,3 \times 0,1 \times 44/60 =$	0,535
P	$0,0025 \times 0,1 \times 62/142 =$	0,00011
ППП		1,9225
O <sub>2</sub> →CO	$10,703 \times 16/12 =$	14,27
Σ		16,74

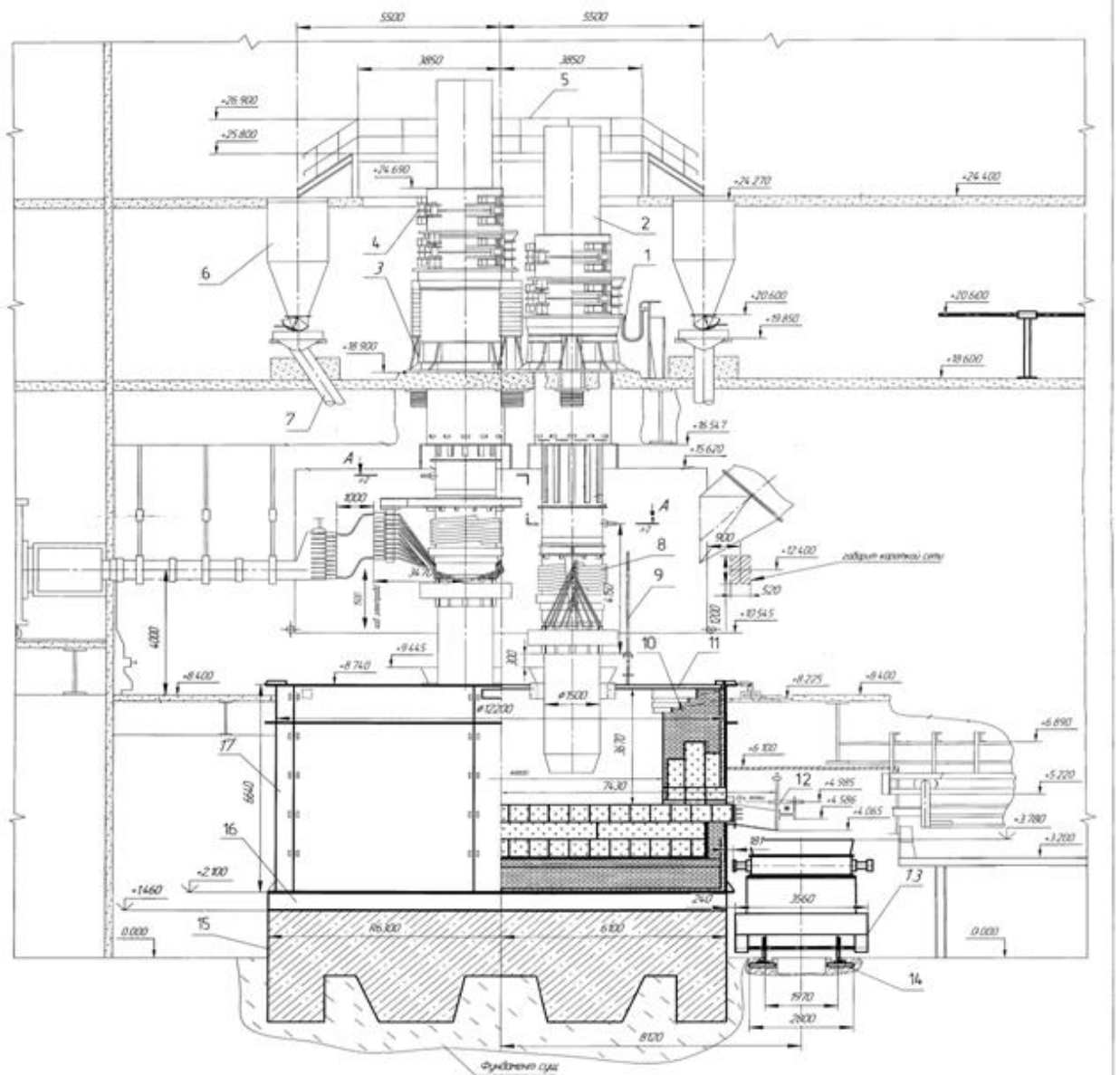
Газы выделяющиеся из антрацита, кг:

S	$5,515 \times 0,0016 \times 0,6 =$	0,0053
SiO	$5,515 \times 0,5464 \times 0,1 \times 44/60 =$	0,223
P	$5,515 \times 0,04 \times 0,1 \times 62/142 =$	0,0096
V	$5,515 \times 0,056 =$	0,31
O <sub>2</sub> →CO	$5,515 \times (89,94 \times 0,173 \times 16/12)/100 - 0,526 =$	1,15
Σ		1,7

Газы выделяющиеся из кокса КНР, кг :

S	$10,703 \times 0,0044 \times 0,6 =$	0,028
SiO	$10,703 \times 0,1367 \times 0,495 \times 0,1 \times 44/60 =$	0,053
P	$10,703 \times 0,0094 \times 0,1 \times 62/142 =$	0,0044
V	$10,703 \times 0,0219 =$	0,234
O <sub>2</sub> →CO	$10,703 \times (0,00712 \times 16/12 + 0,837) =$	9,06
Σ		9,38

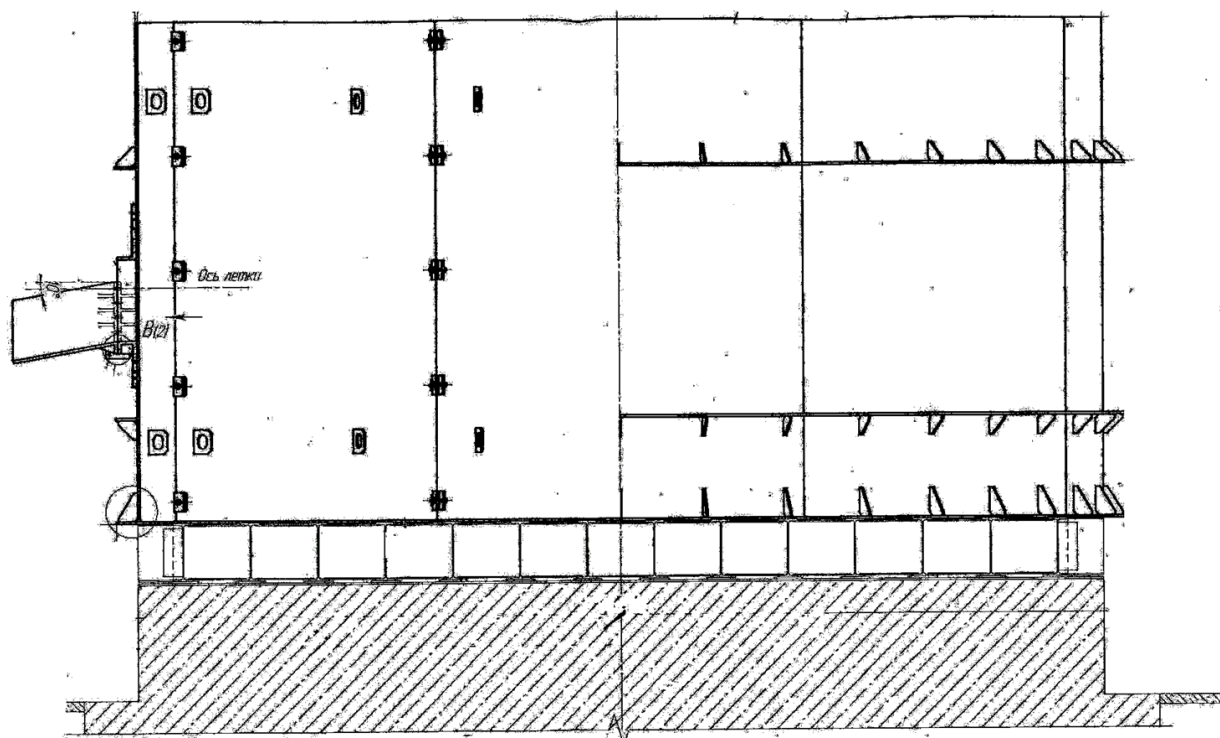
## Приложение В



- 1 – РВД - рукав высокого давления, 2 – кожух электрода, 3 – гидроцилиндр маневра, 4 – гидроцилиндр разжатия, 5 – площадка наращивания электродов, 6 – бункер, 7 – труботечка, 8 – охлаждение мантии, 9 – подвеска с изолятором, 10 – футеровка ванны, 11 – свод печи, 12 – летка печи, 13 – ковшовая телега, 14 – путь выкатки сплавов, 15 – железобетонная плита, 16 – подовые балки.

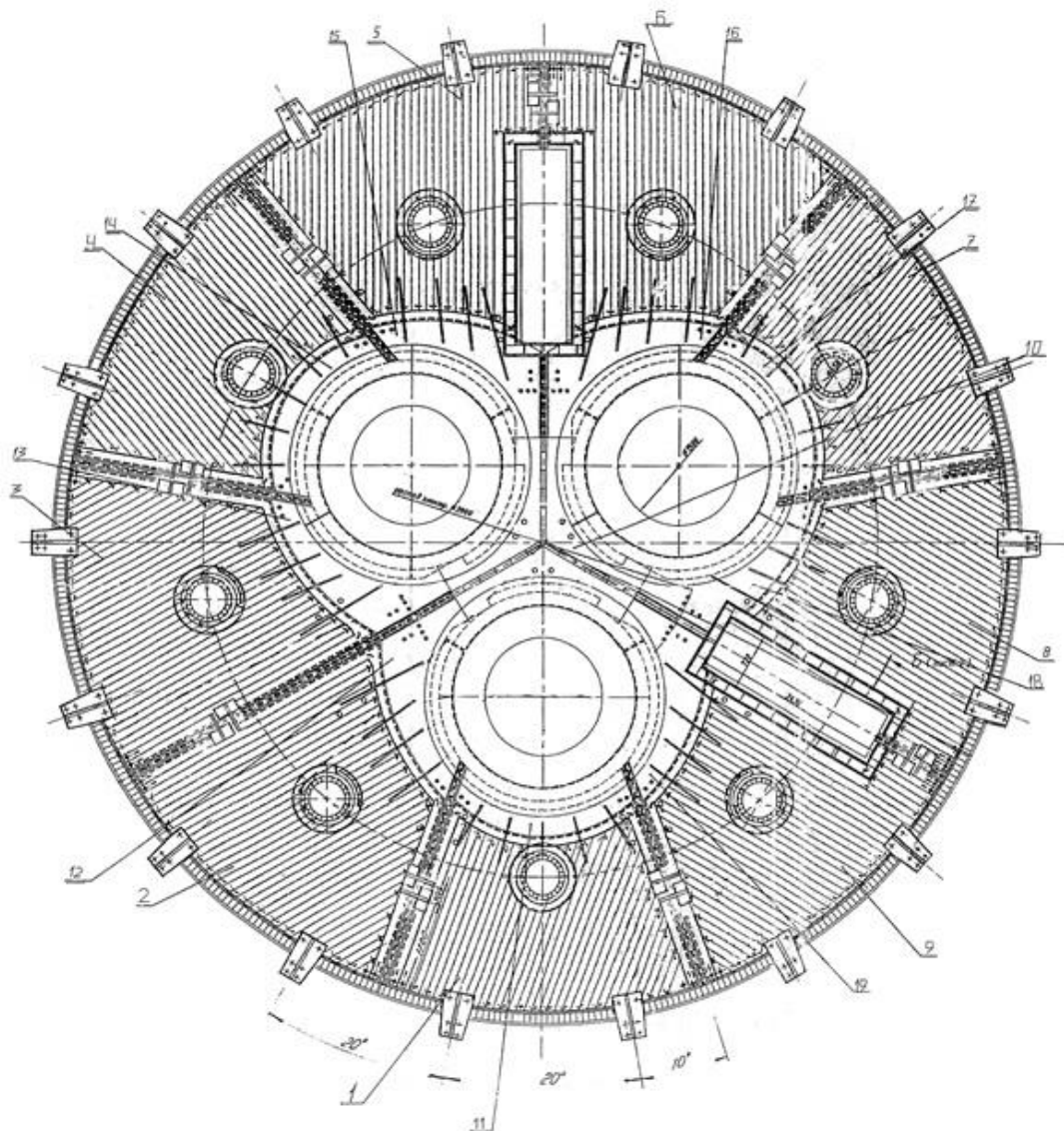
Рисунок В.1 – чертеж электропечи РКЗ – 33М

## Приложение Г



1- кожух ванны, 2 – подовые балки, 3 – железобетонная плита  
Рисунок Г.1 – кожух ванной печи

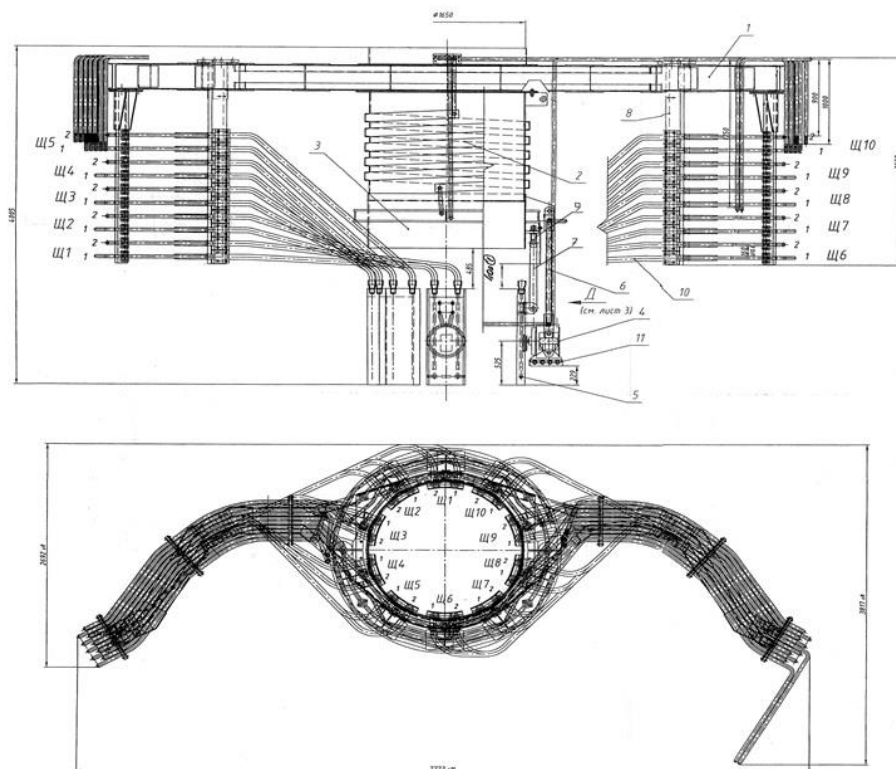
## Приложение Д



1 – 9 секция №1-9, 10 – блок центральных секций (секция %10), 11 – сектор секции №1,  
12 – носок секции №2, 13 – носок секции №3, 14 – сектор секции №4,  
15 – носок секции №5, 16 – носок секции №6, 17 – сектор секции №7,  
18 – носок секции №8, 19 – носок секции №9.

Рисунок Д.1 – структурная схема свода печи

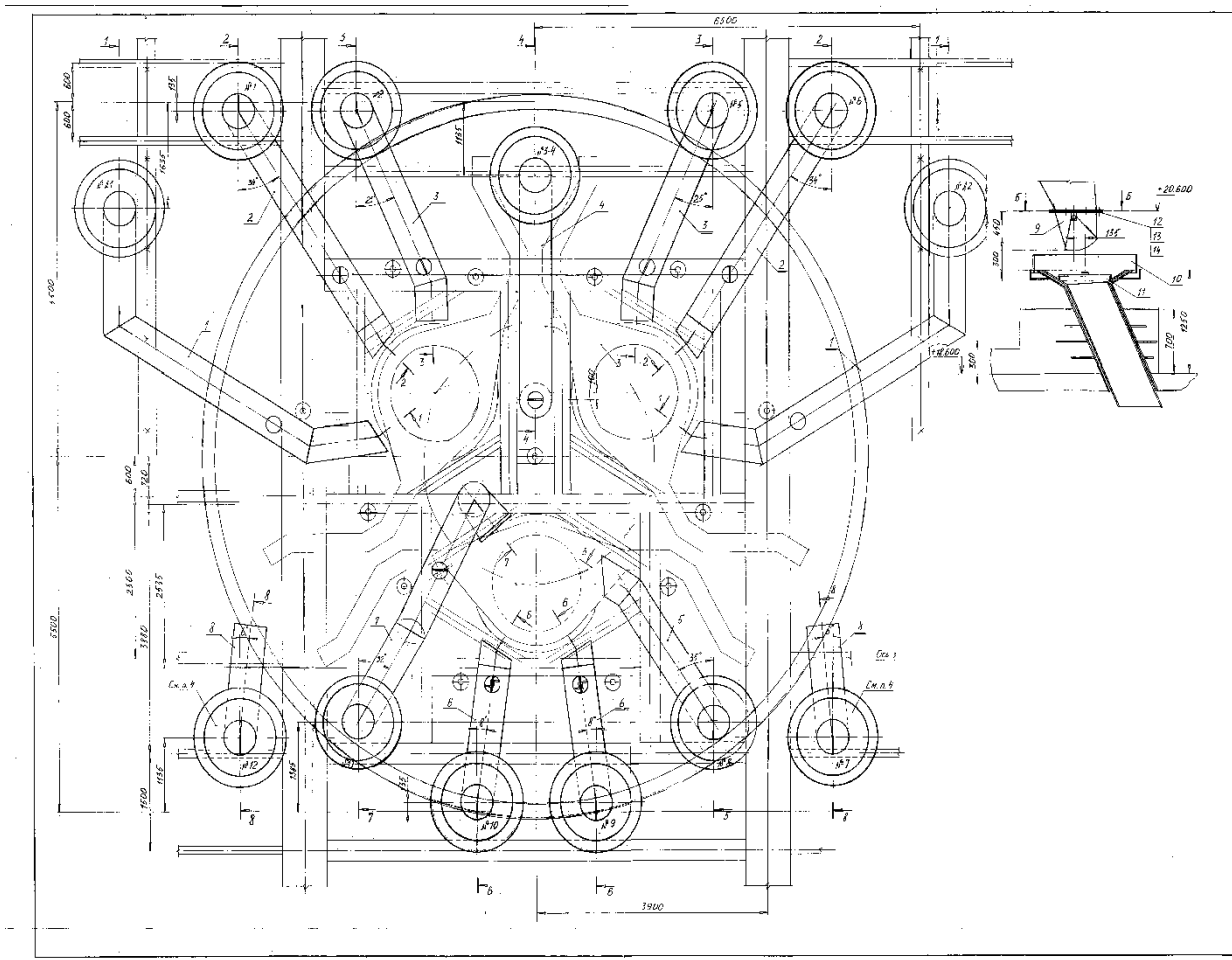
## Приложение Е



1 – траверса токоподвода, 2 – кожух несущий (мантель), 3 - юбка мантеля, 4 – кольцо гидроприжима, 5 – щека контактная, 6 – подвеска кольца гидроприжима, 7 – подвеска щеки контактной, 8 – крайнштейн токовых труб, 9 – серьга подвески щеки контактной, 10 – токовые трубы, 11 – защитный экран кольца гидроприжима

Рисунок Е.1 – чертеж электродержателя

## Приложение Ж



1-10 – трубочка №1-11, 11 – трубочка ДП – 1, 12 – Трубочка ДП – 2  
Рисунок Ж1 – Принципиальная схема системы загрузки

## Приложение 3

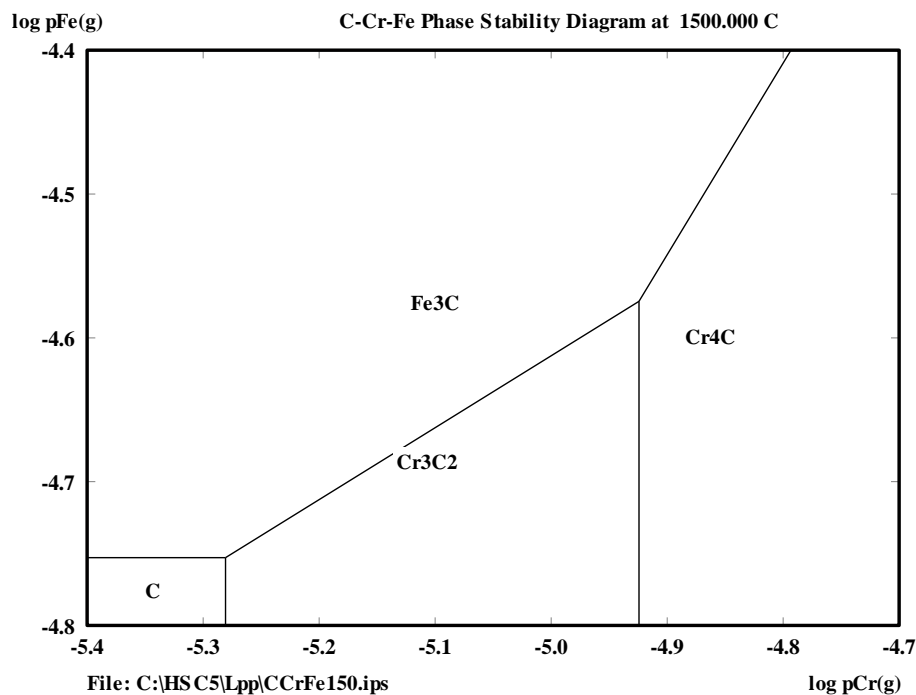


Рисунок 3.1 – Диаграмма фазового равновесия С–Cr–Fe

В системе P – Cr – Fe устойчивыми соединениями при температурах 1200 °С, 1500 °С, 1900 °С являются  $\text{Cr}_3\text{P}$ ,  $\text{Cr}_{12}\text{P}_7$ ,  $\text{Fe}_3\text{P}$ ,  $\text{FeP}$ ,  $\text{FeP}_2$ .

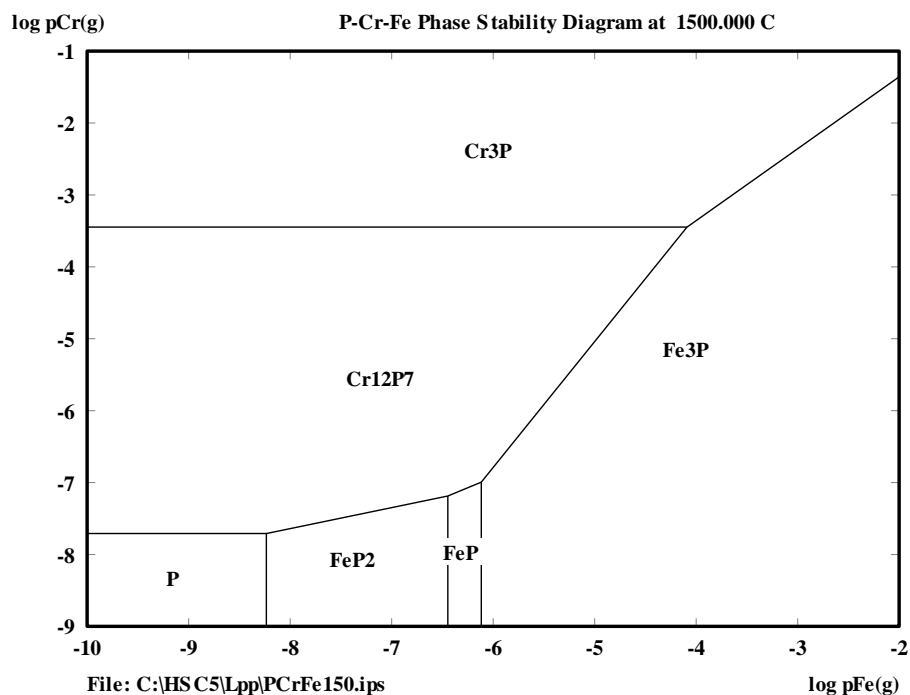


Рисунок 3.2 – Диаграмма фазового равновесия P–Cr–Fe

В системе O – Cr – C устойчивыми соединениями при температурах 1200 °С, 1500 °С, 1900 °С являются  $\text{Cr}(\text{CO})_6$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{Cr}_8\text{O}_{21}$ ,  $\text{CrO}_3$ .



Продолжение приложения 3

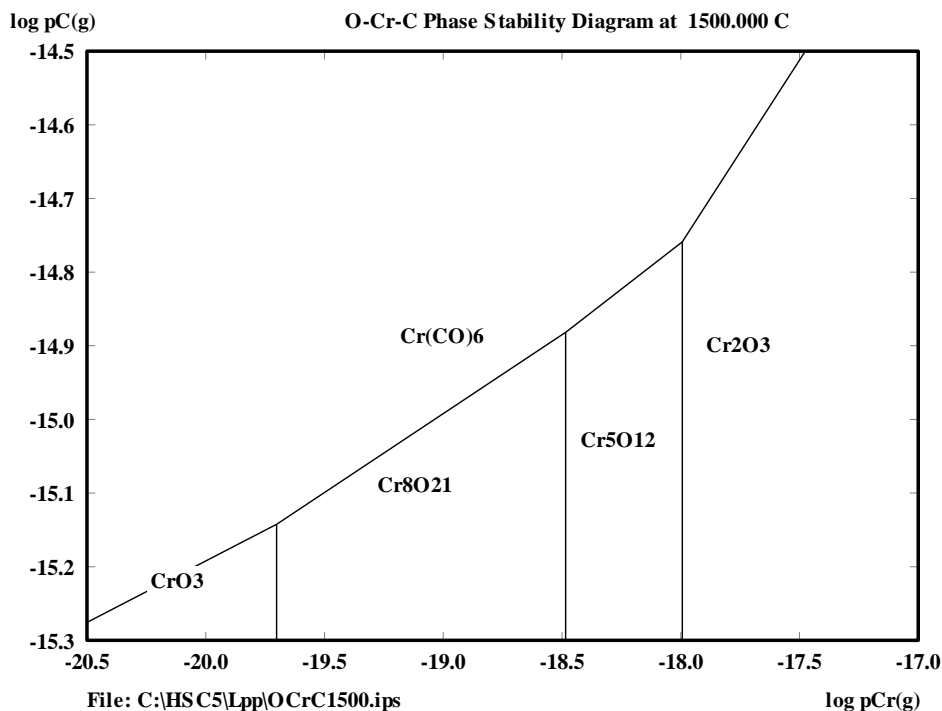


Рисунок 3.3 – Диаграмма фазового равновесия O–Cr–C

В системе C – Cr – Mg устойчивыми соединениями при температурах 1200 °C, 1500 °C, 1900 °C являются Cr<sub>4</sub>C, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Mg<sub>2</sub>C<sub>3</sub>.

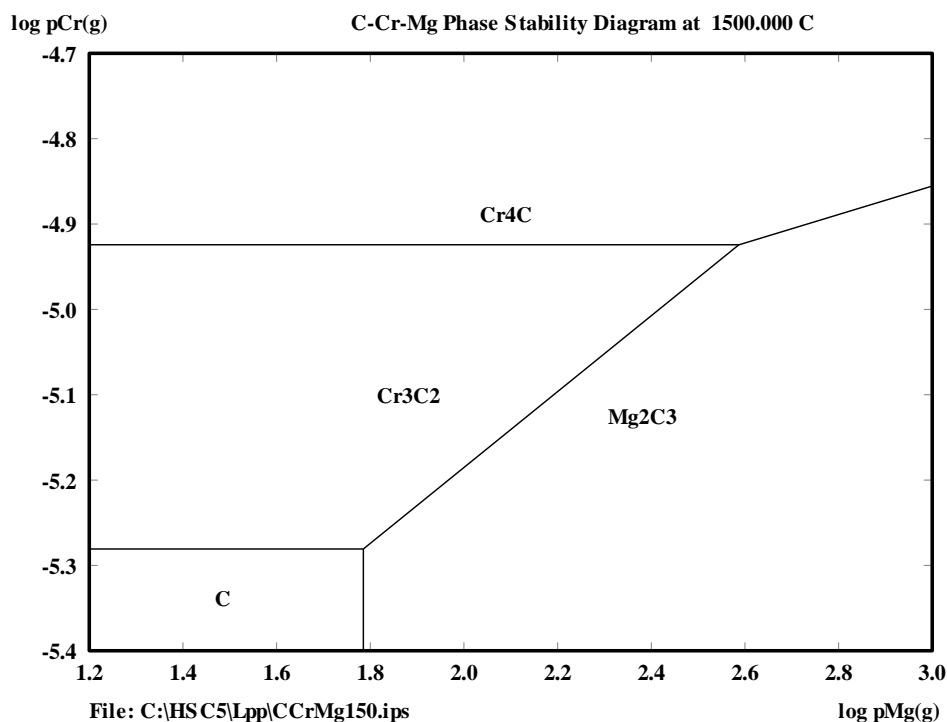
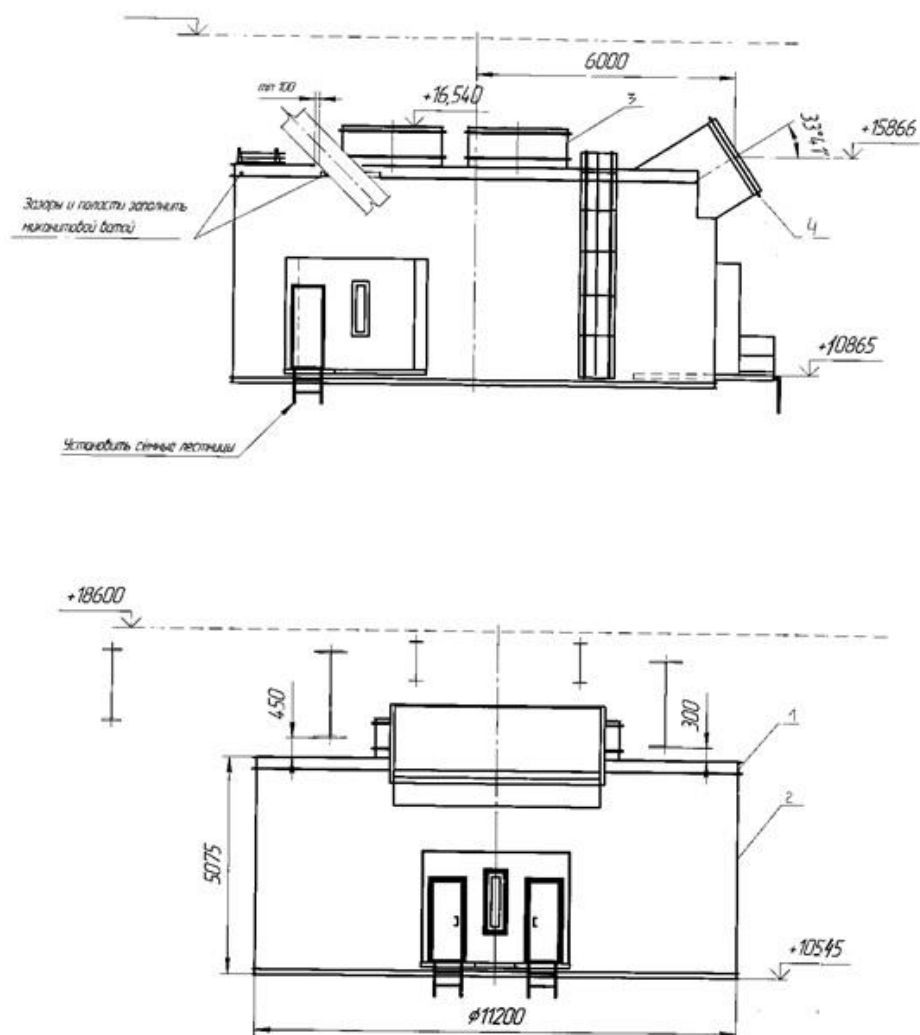


Рисунок 3.4 – Диаграмма фазового равновесия C–CrMgC

## Приложение И



1 – крышка зонта, 2 – юбка зонта, 3 – уплотнение зонта, 4 – патрубок сухой очистки

Рисунок И.1 – чертеж зонта печи

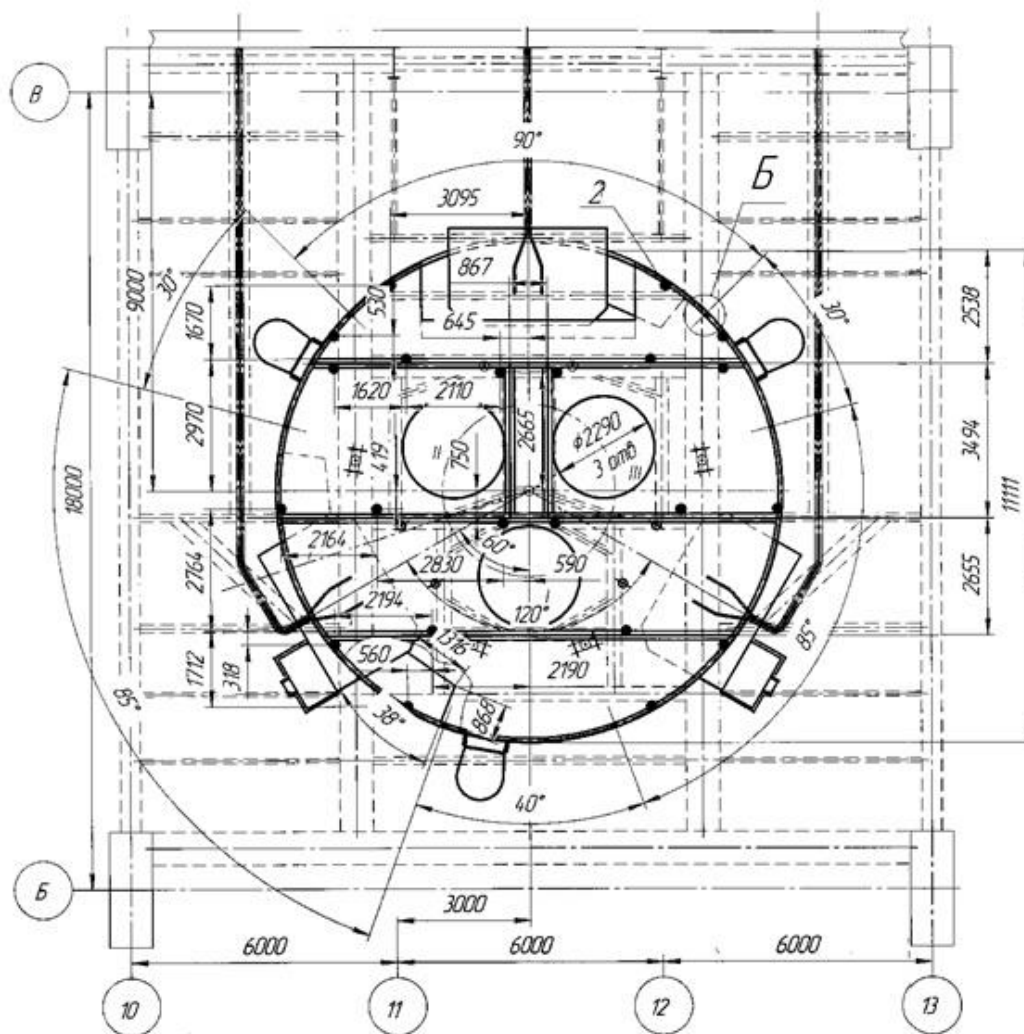


Рисунок И.2 – чертеж зонты печи