

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

Институт металлургии и промышленной инженерии имени О.А. Байконурова

Кафедра металлургических процессов, теплотехники и технологии
специальных материалов

Мамутова Асем Тлековна

Физико-химические исследования слитков титанового сплава тройного
переплава Ti-10V-2Fe-3Al произведенного методом вакуумно-дуговой
плавки

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

6M070900 – «Металлургия»

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

Институт металлургии и промышленной инженерии имени О.А. Байконурова

Кафедра металлургических процессов, теплотехники и технологии
специальных материалов

УДК 669.295 (043)

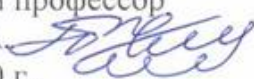
На правах рукописи

Мамутова Асем Тлековна

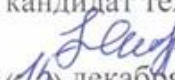
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание степени магистра техники и технологии

Название диссертации	Физико-химические исследования слитков титанового сплава тройного переплава Ti-10V-2Fe-3Al произведенного методом вакуумно-дуговой плавки
Направление подготовки	6M070900 – «Металлургия»

Научный руководитель
Заведующий кафедрой МПТиТСМ
доктор PhD., канд. техн. наук,
ассоциированный профессор
Чепуштанова Т.А. 
«15» декабря 2020 г.

Рецензент
доктор технических наук
 Квятковский С.А.
«15» декабря 2020 г.

Нормоконтроль
кандидат технических наук
 Коныратбекова С.С.
«15» декабря 2020 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой МПТиТСМ
доктор PhD., канд. техн. наук,
ассоциированный профессор
 Чепуштанова Т.А.
«15» декабря 2020 г.

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

Институт металлургии и промышленной инженерии имени О.А. Байконурова

Кафедра металлургических процессов, теплотехники и технологии
специальных материалов

6M070900 – Металлургия

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой МПТиТСМ
доктор PhD., канд. техн. наук

 Чепуштанова Т.А.
«28» февраля 2019 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Мамутовой Асем Тлековне

Тема: Физико-химические исследования слитков титанового сплава тройного переплава Ti-10V-2Fe-3Al произведенного методом вакуумно-дуговой плавки.

Утверждена приказом Ректора Университета № 1784-м от «28» февраля 2019 г.

Срок сдачи законченной диссертации: 10 декабря 2020 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: методы и особенности переплава титановых слитков и сплавов.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

а) критический анализ литературы по физико-химическим исследованиям титановых сплавов методом вакуумно-дуговой плавки;

б) экспериментальная часть, в которой необходимо отразить: характеристика исходных материалов и лигатуры; термодинамическое обоснование получения сплава Ti-10V-2Fe-3Al; методика проведения экспериментов, условия и технологические параметры получения сплавов; описание оборудования, иллюстрации оборудования; физико-химические исследования полученного титанового сплава тройного переплава;

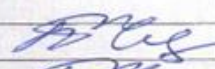
в) вопросы безопасности жизнедеятельности и охраны труда;

г) расчет экономической эффективности разработки.

Перечень графического материала: демонстрационный материал с результатами исследований на 20-25 слайдах.

Рекомендуемая основная литература: список из 54 источников

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Введение	29.11.2019 г.	
Критический анализ литературы по физико- химическим исследованиям титановых сплавов методом вакуумно-дуговой плавки;	20.06.2019 г.	
Экспериментальная часть	27.11.2020 г.	
Заключение	02.12.2020 г.	

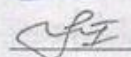
Подписи
консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую
диссертацию с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименование разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Нормоконтроль	С.С. Коныратбекова, канд. техн. наук	20.12.2020 г.	

Научный руководитель

 Чепуштанова Т.А.

Задание принял к исполнению обучающаяся

 Мамутова А.Т.

Дата

«28» февраля 2019 г.

АНДАТПА

Бұл жұмыс үш реттік вакуумдық-доғалық қайта балқыту әдісімен Ti-10V-2Fe-3Al титан қорытпасын балқытудың оңтайлы технологиялық режимдерін анықтау және физика-химиялық қасиеттерін зерттеу болып табылады. Ti-10V-2Fe-3Al титан қорытпалары аэроғарыш саласы объектілерінің маңызды бөлшектерін өндірудің негізгі материалы болып табылады.

Ti-10V-2Fe-3Al титан қорытпаларын өндіру 80-ші жылдардан бастап батыс елдерінде, атап айтқанда АҚШ-та басталды. Бұл қорытпалар оларды аэроғарыш саласында қолдану үлесінің ұлғаюына қарай кеңінен қолданылды. ТМД елдерінің титан өндірісі тәжірибесінде Ti-10V-2Fe-3Al ұқсас титан қорытпалары жоқ, сәйкесінше бұл қорытпаларды өнеркәсіптік өндіру тәжірибесі жоқ.

Диссертациялық жұмыста "ӨТМК" АҚ титан құймалары мен балқымаларын өндіру цехының технологиялық жабдықтарында үш реттік вакуумдық-доғалық балқыту әдісімен Ti-10V-2Fe-3Al титан қорытпаларын балқыту процесінің технологиялық параметрлерін анықтау және оның физикалық және механикалық қасиеттерін зерттеу жүргізілді. Технологиялық параметрлер титан қорытпаларын эксперименттік балқыту негізінде эмпирикалық әдіспен анықталады.

Эксперименттік мәліметтер негізінде қорытпалардың химиялық құрамының электр доғасының кернеуі, ток күші және электродтың балқу жылдамдығы сияқты технологиялық параметрлерге тәуелділігінің математикалық моделі жасалды. Ti-10V-2Fe-3Al балқытылатын титан қорытпалары спецификациялардың барлық талаптарына сәйкес келетін технологиялық параметрлер мәндерінің рұқсат етілген аралығы алынды.

АННОТАЦИЯ

Данная работа является исследованием физико-химических свойств и определением оптимальных технологических режимов плавки титанового сплава Ti-10V-2Fe-3Al методом тройного вакуумно-дугового переплава. Титановые сплавы Ti-10V-2Fe-3Al являются основным материалом для производства высоконагруженных деталей объектов производства аэрокосмической отрасли

Производство титановых сплавов Ti-10V-2Fe-3Al широко освоено с 80-х годов в западных странах, в частности США. В практике титанового производства стран СНГ нет аналогичных титановых сплавов Ti-10V-2Fe-3Al, соответственно нет опыта промышленного производства данных сплавов. Наиболее близким по химическому составу и механическим свойствам является титановый сплав Ti-6V-4Al.

В диссертационной работе произведено определение технологических параметров процесса плавки титановых сплавов Ti-10V-2Fe-3Al методом тройного вакуумно-дугового переплава и изучение его физических и механических свойств. Технологические параметры определены эмпирическим методом на основе проведенных экспериментальных плавок титановых сплавов.

На основе результатов экспериментальных данных составлена математическая модель зависимости химического состава сплавов от технологических параметров. Получен допустимый интервал значений технологических параметров, при соблюдении которых, выплавляемые титановые сплавы Ti-10V-2Fe-3Al соответствуют всем требованиям спецификаций.

ANNOTATION

This work is a study of the physicochemical properties and determination of the optimal technological modes for melting titanium alloy Ti-10V-2Fe-3Al by the method of triple vacuum-arc remelting. Titanium alloys Ti-10V-2Fe-3Al are the main material for the production of critical parts of objects in the aerospace industry.

The production of Ti-10V-2Fe-3Al titanium alloys began in the 80s of the last century in the industrially developed countries of West Europe and USA. These alloys have been widely used as their share in the aerospace industry increased. In the practice of titanium production in the CIS countries, there are no similar to Ti-10V-2Fe-3Al titanium alloys, accordingly there is no experience of industrial production of these alloys.

The technological parameters of the melting process of titanium alloys Ti-10V-2Fe-3Al were determined by the method of triple vacuum arc remelting on the technological equipment of the shop for the production of titanium ingots and alloys of UKTMP JSC and the study of its physical and mechanical properties were made in this dissertation work. Technological parameters are determined by an empirical method based on experimental melting of titanium alloys.

Based on the results of experimental data, a mathematical model of the dependence of the chemical composition of the alloys on technological parameters, such as the voltage of the electric arc, the current strength and the rate of electrode melting, has been compiled. An admissible range of values of technological parameters was obtained, subject to which the melted titanium alloys Ti-10V-2Fe-3Al meet all the requirements of the specifications.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	11
1	Критический анализ литературы по физико-химическим исследованиям титановых сплавов методом вакуумно-дуговой плавки	15
1.1	Свойства титана и сплавов титана	15
1.1.1	Химические свойства и коррозия титана	15
1.1.2	Физические свойства титана	16
1.1.3	Механические свойства титана	17
1.1.4	Свойства титановых сплавов	18
1.2	Аналитика титанового производства в мировом масштабе	19
1.3	Методы и особенности переплава титановых слитков и сплавов	19
1.3.1	Получение высокочистого титана	22
1.3.2	Вакуумно-дуговая плавка	23
1.4	Экономическая аналитика титанового производства в целом, сравнительные характеристики с мировым производством	24
1.5	Компаний Сафран и Ауберт Дюваль	27
2	Экспериментальная часть	29
2.1	Характеристика исходных материалов и лигатуры и их влияние на физико-химические характеристики титанового сплава	29
2.1.1	Подбор шихтовых материалов	29
2.1.2	Структурные свойства сплава Ti-10-2-3	29
2.2	Термодинамическое обоснование получения сплавов Ti-10-2-3	33
2.3	Описание и характеристика оборудования	33
2.4	Методика проведения экспериментов, условия и технологические параметры получения титановых сплавов Ti-10-2-3	35
2.4.1	Составление и программирование расчета шихтовых материалов	35
2.4.2	Прессование брикетов	37
2.4.3	Сварка титанового электрода	37
2.4.4	Проведение процессов вакуумно-дуговых переплавов	38
2.4.5	Первый переплав	39
2.4.6	Второй переплав	39
2.4.7	Окончательный (третий) переплав	40
2.5	Физико-химические исследования полученного сплава тройного переплава	40
2.6	Разработка математической модели по показателям технологии тройного переплава Ti-10-2-3, произведенного методом вакуумно-дуговой плавки	46
2.6.1	Математическая модель процесса тройного переплава	47
2.7	Рекомендации по автоматизации процесса технологии тройного переплава Ti-10-2-3, произведенного методом вакуумно-дуговой плавки	51
3	Расчет экономической эффективности производства титанового	54

	сплава тройного переплава на АО «УК ТМК»	
3.1	Параметры проекта	54
3.2	Концепция проекта	54
3.3	Преимущества проекта	54
3.4	Инвестиционный план	54
3.5	Трудовые ресурсы	55
3.6	Оценка эффективности реализации проекта	55
	Заключение	58
	Список использованной литературы	60
	Приложение А. Диаграмма производственной мощности титановых слитков и сплавов в разрезе стран, в период с 2000-2019 гг. (тыс. тонн в год)	64
	Приложение Б. Диаграмма производственных мощностей стран, по видам технологий получения титановых сплавов за 2019 год (тыс. тонн в год)	65
	Приложение В. Диаграмма экспорта продуктов плавки по странам-производителям в период с 2013 г. по 2019 г	66
	Приложение Г. Характеристики сырья, материалов, полупродуктов и энергоресурсов	67
	Приложение Д. Схема перехода атома титана из β -фазы в α -фазу	69
	Приложение Е. Влияние элементов на температуру полиморфного превращения титанового сплава	70
	Приложение Ж. Требования спецификаций MTL-3105 компании Сафран и AQA-5102 компании Ауберт Дюваль	71
	Приложение И. Расчетный состав титановых электродов	72
	Приложение К. Результаты химического анализа сплавов	74
	Приложение Л. Результаты химических анализов проб с внутренних поверхностей на срезах от 4-х экспериментальных сплавов	75
	Приложение М. Результаты механических испытаний сплава	76
	Приложение Н. Результаты механических испытаний сплава	77
	Приложение П. Фрагменты вычислений параметров, полученные при расчете математической модели	78
	Приложение Р. Расчет показателей оценки целесообразности реализации проекта	80
	Приложение С. Вопросы безопасности жизнедеятельности и охраны труда	83
	Приложение Т. Акт внедрения в УК ТМК научно-исследовательской магистерской диссертационной работы	90
	Приложение У. Публикация, Сатпаевские чтения 2020	93

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

ISO 45001 – Международный стандарт, система менеджмента охраны здоровья и безопасности труда – Требования и рекомендации по применению.

ISO 14001:2015 – Международный стандарт, система экологического менеджмента – Требования по их применению.

ГОСТ 27575-87 – костюмы мужские для защиты от общих производственных загрязнений и механических воздействий.

ГОСТ 12.4.207-99 – каски защитные.

ГОСТ 124.010-75 – рукавицы специальные.

ГОСТ 12.4.187-98 – обувь специальная кожаная для защиты от общих производственных загрязнений.

ГОСТ 18724-88 – обувь валяная грубошерстная.

ГОСТ 25296-03 – изделия швейные бельевые.

ТУ - РСФСР-0300142-45-91 – перчатки трикотажные с точечным ПВХ покрытием.

ГОСТ 12.4.230.1-2007 – средства индивидуальной защиты глаз.

ГОСТ 12.4.041-01 – средства индивидуальной защиты органов дыхания фильтрующие.

ГОСТ 12.4.051-87 – средства индивидуальной защиты органов слуха.

MTL-3105 – спецификация компании «Сафран» (Франция)

AQA-5102 – спецификация компании «Ауберт Дюваль» (Франция)

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

УКТМК – Усть-Каменогорский титано-магнийевый комбинат;

Титановый сплав 10-2-3, Ti-10-2-3 – сплав марки Ti-10V-2Fe-3Al;

АСУТП – автоматизированная система управления технологическими процессами;

СИЗ – средства индивидуальной защиты;

ВДП – вакуумно-дуговая плавка;

ЭЛП – электронно-лучевая плавка;

ПДП – плазменно-дуговая плавка;

ИП – индукционная плавка;

ЭШП – электрошлаковая плавка;

ВВЕДЕНИЕ

Оценка современного состояния решаемой научно–технологической проблемы.

Начиная со второй половины прошлого столетия, широкое применение титановых слитков и сплавов в аэрокосмической отрасли объясняется их оптимальными механическими свойствами, таким как, высокая прочность, пластичность, относительно небольшой удельный вес. Расширение области применения титановых сплавов способствовало изучению и разработке новых технологий по производству их большой номенклатуры. Одним из наиболее распространенных сплавов титана, применяемых в аэрокосмической отрасли, является сплав Ti-10V-2Fe-3Al.

Сплав Ti-10-2-3 – разработанный в 80-х годах прошлого столетия в США – высокопрочный β -титановый сплав, производимый методом тройного вакуумно-дугового переплава, предназначен для изготовления высоконагруженных деталей, применяемых в авиационной и аэрокосмической отрасли (конструкций планеров, шасси, пилонов, дверей, шарниров, цапф, подшипников, деталей вертолетов и др.).

Из сплава Ti-10-2-3 в Российской Федерации в начале 2000-х годов было создано производство различных изделий для крупнейшей в мире американской авиастроительной компании Боинг. На сегодняшний день из этого сплава производят слитки, кованные билеты, прутки, а также более ста видов штампованных поковок массой от 20 до 3200 кг [1, 2]

Следует отметить, что сплавы, аналогичные Ti-10-2-3, в отличие от других титановых сплавов не производятся на предприятиях стран СНГ. В связи с чем, в научной литературе стран СНГ отсутствует какая-либо доступная информация по данному типу сплавов, за исключением общих сведений в справочниках [1, 2].

АО «Усть-Каменогорский титано-магниевый комбинат» (далее – АО «УК ТМК») до 2019 года не имел опыта промышленного производства титановых сплавов тройного переплава Ti-10-2-3. С 2019 АО «УК ТМК» совместно с французской компанией Сафран реализует проект по производству титановых сплавов Ti-10-2-3 для критических изделий авиакосмического назначения.

Основание и исходные данные для разработки темы.

Основанием для разработки темы является потребность рынка и производственных линий АО УК ТМК в создании нового вида титановых сплавов Ti-10-2-3, которые способны расширить номенклатуру продукции с высокой добавленной стоимостью и быть представленными мировому рынку потребителей титановой продукции. Обоснованием необходимости выполнения магистерской диссертации является удовлетворение растущего спроса на новые виды изделий на основе титановых сплавов Ti-10-2-3 производства АО «УК ТМК» для аэрокосмического применения.

Компании Сафран и Ауберт Дюваль являются мировыми лидерами в области разработки высокотехнологических решений для аэрокосмической и авиационной промышленности. Растущий спрос на европейском рынке на продукцию ответственного назначения, выпускаемой компаниями Сафран и Ауберт Дюваль,

позволил АО «УКТМК» сотрудничать с данными компаниями в промышленной разработке, освоении технологии выпуска, производства сплавов марки Ti-10-2-3.

В работе рассмотрены способы получения титановых сплавов; аналитика титанового производства в мировом масштабе; экспериментальные исследования получения сплавов тройного переплава Ti-10V-2Fe-3Al; физико-химические исследования полученного титанового сплава тройного переплава; разработка математической модели по технологическим показателям технологии тройного переплава Ti-10V-2Fe-3Al произведенного методом вакуумно-дуговой плавки; рекомендации по автоматизации процесса; расчет экономической эффективности внедрения производства титанового сплава тройного переплава в условиях АО «УКТМК».

Обоснование необходимости проведения научно–исследовательской работы.

Необходимость выполнения настоящей научно–исследовательской работы продиктована Государственной Программой индустриально–инновационного развития Республики Казахстан на 2020–2025 годы. В частности, в Программе сказано, «Привлечение новых транснациональных компаний также должно носить характер, максимально соответствующий интересам государства в достижении поставленных задач, а именно производство новых видов товаров с большей добавленной стоимостью и экспорт на мировые рынки через инструменты партнеров – транснациональных компаний по распределению товаров (налаженные каналы сбыта)». Также в Программе сказано, что «Достижение цели Программы будет измеряться в частности, ростом объема экспорта обрабатывающей промышленности, увеличением объемов производства и расширение номенклатуры обработанных товаров, пользующихся спросом на внутреннем и внешних рынках» [34]. В связи с этим исследование титановых сплавов Ti-10-2-3 внедрение их в производство является обоснованным.

Актуальность работы.

Различные титановые сплавы, в том числе и жаропрочные имеют широкое применение в абсолютно разных отраслях промышленности. Изучение и разработка титановых сплавов для потребностей авиационной и космической техники, включая авиационные газотурбинные и ракетные двигатели, продолжаются на протяжении более 50 лет. Первоначально масса титановых деталей составляла 5–10 % от общей массы газотурбинного двигателя, в современных конструкциях весовая доля титановых сплавов составляет уже около 40 % [33].

Таким образом, титановые сплавы нашли широкое применение в авиакосмической промышленности для изготовления критических деталей авиационной и космической техники.

Развитие многих отраслей современного производства неразрывно связано с разработкой новых материалов, обладающих высоким комплексом механических свойств. При использовании традиционных технологических процессов не всегда удается получать материалы с требуемым уровнем показателей прочности, надежности и долговечности. Один из эффективных путей получения титановых сплавов тройного переплава является метод вакуумно-дуговой плавки.

Актуальность данной работы обусловлена возрастающей долей титановых сплавов в критических деталях авиационной техники и освоении производства титанового сплава Ti-10-2-3 в промышленном масштабе на существующем технологическом оборудовании цеха по производству титановых слитков и сплавов АО «УК ТМК». Производство нового вида титановых сплавов Ti-10-2-3 позволит АО «УК ТМК» расширить номенклатуру продукции с высокой добавленной стоимостью, увеличить прибыль компании, а также повысить конкурентоспособность Казахстанского титана на мировых рынках.

Цель работы: Определение физико-химических свойств и оптимальных режимов плавки титанового сплава Ti-10-2-3, произведенного методом тройного вакуумно-дугового переплава в условиях АО «УК ТМК».

Объектами исследования является титановый сплав Ti-10-2-3 полученный методом тройного вакуумно-дугового переплава в цехе по производству титановых слитков и сплавов АО «УК ТМК».

Для выполнения поставленной цели необходимо решение следующих **задач**:

- Определение базовых технологических параметров плавки титанового сплава Ti-10-2-3 на основании режимов плавки аналогичных титановых сплавов BT-6 (Ti-6Al-4V);
- Проведение экспериментальных плавов титановых сплавов Ti-10-2-3 при разных режимах третьего переплава;
- Математическое моделирование результатов экспериментов с определением оптимальных технологических параметров плавки;
- Определение физико-механических свойств полученных титановых сплавов Ti-10-2-3.

Научная новизна:

- Методом тройного вакуумно-дугового переплава установлено, что полученные в ходе химического анализа сплава Ti-10-2-3, произведенного по заданным значениям элементов: Al – 3,25 %, V – 9,7 %, Fe – 1,95 %, O – 0,105 %, и скоростью на первом переплаве 10 кг/мин, втором – 8 кг/мин и низкой скоростью на третьем переплаве – 3,5 кг/мин определяют прямую зависимость сегрегации химических элементов Fe, O, Al от выбранного режима напряжения электрической дуги и скорости плавления третьего переплава.
- Экспериментальными данными подтверждено, что наиболее важным фактором для достижения химического состава сплава, соответствующего спецификации, является низкая скорость на окончательном третьем переплаве титанового сплава марки Ti-10V-2Fe-3Al.

Новые научные результаты:

- результаты испытаний зависимости твердости по Виккерсу от температуры для металла в литом состоянии и после деформации и термообработки, показали, что деформированный и термообработанный металл в температурном диапазоне до рекристаллизации (610-640 °C) по сравнению с литым состоянием показывает более высокую твердость. Установлено, что твердость деформированных и термообработанных образцов сплава составил 3390-3400 МПа при 20 °C, что по среднему показателю выше на 450-480 МПа твердости литого сплава.

– методом оптической микроскопией шлифов литого и кованного сплава Ti-10V-2Fe-3Al установлено, что металл не имеет макро- и микродефекты и дефектов «бэта-флэк». Установлено, что дефекты «бэта-флэк» характеризуются темными и светлыми контрастными областями в макроструктуре металла, что объясняется повышенной сегрегацией легирующих элементов в составе сплава.

– установлено, что в литом состоянии образцы сплава Ti-10V-2Fe-3Al в ходе механических испытаний показали высокую прочность на уровне 939-1010 МПа и невысокую пластичность $\delta=1,8-12,1\%$.

– установлено, что исследованные образцы деформированного и термообработанного металла показывают высокую прочность (1189-1207 МПа) и сравнительно высокую пластичность ($\delta=11,3-13,7\%$), при этом разрушаются с образованием шейки. Установлено, что разброс значений предела прочности не превышал 15 МПа (1,2 %), что свидетельствует о хорошей однородности металла.

Практическая значимость результатов работы состоит в выплавке титановых сплавов Ti-10-2-3 из исходного сырья, произведенного в цехе по производству титана губчатого и на технологическом оборудовании цеха по производству титановых слитков и сплавов АО «УК ТМК».

Апробация работы: По результатам исследований проведены промышленные испытания в части выплавки титановых сплавов Ti-10V-2Fe-3Al методом тройного вакуумно-дугового переплава, получен акт внедрения результатов магистерской диссертации в АО «УК ТМК» в виде промышленных испытаний, 2020 год (Приложение Т).

Основные положения работы по теме диссертации изложены в статье «Физико-химические исследования слитков титанового сплава тройного переплава Ti-10V-2Fe-3Al произведенного методом вакуумно-дуговой плавки», в сборнике материалов международной научно-практической конференции «Сатпаевские чтения - 2020», Алматы, 2020, 1 том, С. 511-515. Публикация охватывает результаты исследовательской работы, соответствуют выводам диссертации.

1 Критический анализ по физико-химическим исследованиям титановых сплавов методом вакуумно-дуговой плавки

1.1 Свойства титана и его сплавов

1.1.1 Химические свойства и коррозия титана

Химические свойства титана определяются строением электронной оболочки его атома и положением в периодической системе Менделеева.

Титан занимает в периодической системе элементов 22-е место. Распределение электронов в электронных оболочках выглядит следующим образом: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^2 4s^2$.

Титан относится к переходным элементам с недостроенным 3d-электронным слоем. Вместе с цирконием, гафнием и торием титан образует подгруппу четвертой группы периодической системы Менделеева.

Согласно строению электронной оболочки атома, для титана наиболее характерны соединения, в которых он четырехвалентен, однако титан довольно легко образует соединения, в которых он трехвалентен.

Титан при повышении температуры становится химически активным и динамично взаимодействует с галогенидами, кислородом, серой, углеродом, азотом и другими элементами. Титановая пыль, взвешенная в воздухе, является сильно взрывчатой.

Титан – один из немногих элементов, которые при накаливании сгорают в атмосфере азота. Водород в значительных количествах поглощается титаном при комнатной температуре.

Водород, азот, кислород и углерод, взаимодействуя с титаном, существенно изменяют его свойства.

Титан характеризуется высокой коррозионной устойчивостью в воздухе при низких и высоких температурах. При нагреве до температуры до 600 °С титан покрывается окиснонитридной пленкой. Скорость диффузии кислорода через окисную пленку при низких температурах мала, поэтому хорошо защищает титан от дальнейшего разрушения.

Чистый титан может длительно использоваться при температурах до 550-560 °С. Выше этой температуры проницаемость поверхностного слоя для кислорода увеличивается. Несмотря на это, титан обладает сравнительно большой стойкостью при температурах 1200 °С, чем нержавеющая сталь.

Весьма ценным свойством титана является его коррозионная стойкость в воде, в том числе морской. Титан не подвергается коррозии в морской воде. Электродные потенциалы измерялись на образцах, поверхность которых была обработана по-разному. Результаты работы показали, что поведение титана подобно поведению нержавеющей стали.

Исследовались действия различных кислот разной концентрации и при разных температурах. Установлено что, титан устойчив в соляной кислоте при низких концентрациях. В азотной кислоте титан устойчив при всех концентрациях.

Титан более устойчив по отношению к растворам серных и соляных кислот, не содержащих воздуха. Титан совершенно устойчив в растворах хлоридов железа, меди, олова, ртути, марганца, никеля, натрия, аммиака, кальция, магния, бария, цинка при всех концентрациях. Однако, титан не устойчив в растворах хлорида алюминия.

Плавиковая кислота в водных растворах является одним из наиболее активных растворителей титана. Однако смеси плавиковой и азотной кислот растворяют металл быстрее, чем плавиковая кислота.

Установлено, что пары хлоридов действуют на титан сильнее, чем расплав. В результате коррозионного разрушения образуется суспензия металлического титана и окислов титана с солевым расплавом.

Коррозия титана зависит от предшествующей его обработки. Холодно прокатанный титан подвергается коррозии в серной кислоте различной концентрации в гораздо более значительной степени, чем титан отожженный. Высокая коррозионная стойкость титана обусловлена наличием на его поверхности окисных защитных пленок. Можно создавать специально защитные пленки, обладающие характерными свойствами. Покрытия на титане, сопротивляющиеся истиранию, получают анодным окислением в 5 % растворе гидроксида натрия при температуре 95 °С и последующим погружением в растворы.

Разработаны керамические покрытия для титана, защищающие его от окисления до температуры 925 °С и плотные металлические покрытия медью и молибденом.

1.1.2 Физические свойства титана

Атомный вес титана 47,90.

Масс-спектрографические исследования показали, что титан имеет пять изотопов с массовыми числами 46, 47, 48, 49, 50. Основная линия соответствует изотопу с массовым числом 48.

Титан встречается в двух полиморфных модификациях α -титан, имеющий гексагональную плотно упакованную решетку, существующую при температурах ниже 885 °С, и β -титан – высокотемпературная кубическая объемно-центрированная модификация.

О существовании полиморфного превращения титана было известно еще в 1931 г. Температура этого превращения определялась многими исследователями. Первое надежное значение температуры получено по измерениям электрического сопротивления образца йодидного титана и соответствует (882 ± 20) °С.

Первое надежное измерение плотности титана принадлежит немецкому физику Гюнтеру [11], впервые получившему образец чистого титана. По его измерениям, плотность титана равна 4,50 г/см³. Более поздние многочисленные измерения давали для плотности α -титана значения от 4,506 до 4,54 г/см³.

По измерениям американского ученого Кроля [11], титан высокой чистоты (99,9 %) имеет средний коэффициент линейного расширения $\alpha=8,79 \cdot 10^{-6}$ в интервале температур от 0 до 850 °С.

Последующие определения американских ученых Джонса, Ориани и Шофилда [11], проводившиеся очень тщательно с чистыми препаратами титана, привели к значениям (1667 ± 4) °С и (1665 ± 5) °С, используя кристаллы титана высокой чистоты, определили температуру плавления титана в вакууме около 10^{-5} мм рт.ст. равной (1668 ± 3) °С. Последние три значения являются, наиболее точными. Соответственно наиболее достоверное значение температуры плавления титана (1668 ± 4) °С.

Удельная теплоемкость титана при температуре 25°С оценивается в 0,126 кал/г*ат. и атомная теплоемкость соответственно в 6,05 кал/г*ат.

Энтропия при температуре 298,16К, равна $(7,33 \pm 0,02)$ энтропийных единиц.

При температуре кристаллизации поверхностное натяжение было определено равным (1510 ± 18) эрг/см² как в вакууме, так и в атмосфере гелия.

Значение сопротивления титана технической частоты (99,5 %) при температуре 20 °С равно $78,6 \cdot 10^{-6}$ ом см.

Титан парамагнитен, его магнитная восприимчивость при температуре -170 °С равная $1,6 \cdot 10^{-6}$ см³/г, падает до $1,25 \cdot 10^{-6}$ см³/г при минус 80 °С и остается той же и при 20 °С.

1.1.3 Механические свойства титана

Чистейший титан очень пластичен. Предел прочности на разрыв данного титана составляет 22-26 кг/мм² при удлинении, достигающем 60 % и более.

Небольшие количества примесей, содержащихся, например, в магнийтермическом титане технической частоты, гораздо увеличивают прочность и уменьшают пластичность. Предел прочности (σ) увеличивается до 54-64 кг/мм² при удлинении на 30-25 %. Особенно резко механические свойства изменяют обычные для технического титана примеси – азот, кислород и углерод.

Прочность и твердость деформированного в холодном состоянии титана постепенно уменьшается при нагревании. Деформация и отжиг оказывают большое влияние на форму зерна и его величину.

По мере увеличения степени деформации рекристаллизация начинается при малых температурах. Образцы, деформированные на 2,5 %, начинают рекристаллизовываться при температуре 700 °С, на 5% при 600 °С. Образцы, деформированные на 50 % и более, полностью рекристаллизуются уже при температуре 500 °С.

Оптимальный температурный режим отжига чистого титана для получения мелкозернистой рекристаллизованной структуры α -титана соответствует температуре 650-800 °С.

При исследовании влияния легирующих элементов на температуру рекристаллизации титана установлено, что ее сильно повышают даже малые количества кислорода, азота, углерода, бериллия, бора, рения и алюминия.

Механические свойства титана и его сплавов наиболее чувствительны к структурным превращениям. Структура титановых сплавов может претерпевать многообразные изменения в связи с различными операциями термической обработки.

В титане, как и во многих других металлах, в результате пластической деформации и в соответствии с кристаллической ориентацией появляется анизотропия свойств, даже в поликристаллическом конгломерате. Величина модуля упругости в зависимости от направления может изменяться от 9800 до 14 000 кг/мм².

При испытании кованых образцов модуль сдвига был определен равным 4450 кг/мм², предел прочности титана при скручивании - 71,2 кг/мм², коэффициент Пуассона - 0,33 [11].

Предел усталости при изгибе листа титана толщиной 1,3 мм был установлен 17,5 кг/мм².

1.1.4 Свойства титановых сплавов

Важнейшими преимуществами титановых сплавов перед другими конструкционными материалами являются их высокие удельная прочность и жаропрочность в сочетании с высокой коррозионной стойкостью. Перечисленные качества титановых сплавов открывают большие перспективы их применения в тех областях машиностроения, где требуются данные характеристики. Это относится, в первую очередь, к таким отраслям техники как авиастроение, ракетостроение, судостроение, химическое, пищевое и транспортное машиностроение.

Титановые сплавы целесообразно разделить на три большие группы:

Конструкционные и высокопрочные титановые сплавы – обеспечивающие оптимальное соотношение характеристик прочности и пластичности.

Жаропрочные титановые сплавы – обеспечивающие им повышенную жаропрочность при минимальном снижении пластичности с большим или меньшим количеством химического соединения (или начальной стадии его образования).

Титановые сплавы на основе химического соединения – представляют интерес как жаропрочный материал с низкой плотностью, способный конкурировать с жаропрочными никелевыми сплавами в различном температурном интервале.

В течение 200 лет титан прошел путь от считавшегося непригодным металла для конструкционных целей до всеобщего признания его одним из важнейших конструкционных металлических материалов. Начиная с 1940 г. после изобретения американским ученым Кролем магнийтермического метода восстановления металлического титана из тетрахлорида, металлический титан начал применяться в промышленности. На сегодняшний день титан считается одним из самых перспективных и вечных металлов.

1.2 Аналитика титанового производства в мировом масштабе

Титан и его сплавы, имеющие уникальные физико-химические свойства, являются ключевыми, во многих отраслях промышленности [1,2]. Применение титановых сплавов позволило создать уникальные образцы авиакосмической и глубоководной морской техники, обеспечило прорыв во многих отраслях экономики в XX веке. Диапазон наукоемких и высокотехнологичных отраслей промышленности, использующих титан и титановые сплавы, активно расширяется, обеспечивая создание высокоэффективных и перспективных конструкционных материалов нового поколения, способных функционировать при температурах от минус 196 до плюс 600 °С. Аэрокосмическая отрасль является доминирующим потребителем конструкционных титановых изделий, на долю которой приходится практически половина от всего количества потребляемого титана в мире [3].

Мировое производство титановой губки и титановых сплавов аэрокосмического назначения сосредоточилось всего в четырёх странах: России, США, Японии и Казахстане [4]. Китай является лидером потребления титана губчатого. Доля Америки в объёме мирового потребления титана губчатого составляет 30 %. Потребление титановых изделий в аэрокосмическом секторе имеет большое значение в США от 60 до 75 %, и Европе от 25 до 40 %.

Основными поставщиками титана губчатого в США являются Япония, Россия и Казахстан. Импорт в США составляет более половины мировой торговли титана губчатого. Американские предприятия сильно зависят от импорта из Японии и Казахстана. В Японии на гражданский авиакосмический сектор приходится около 2-3 % от 30 % общего потребления титана в оборудовании и конструкционных элементах химических заводов. Ориентировочно 20 % от общего спроса в Японии приходится на атомную энергетику и на электростанции на твёрдом топливе, остальная доля приходится на архитектуру, медицину и спорт.

1.3 Методы и особенности переплава титановых слитков и сплавов

Получаемый в промышленных масштабах губчатый титан методом магнийтермического восстановления тетрахлорида титана содержит от 0,2 до 0,5 % примесей в зависимости от марки, который является полупродуктом и предназначен для переплава в слитки.

При плавке шихты, основой которой является титан губчатый, происходит увеличение содержания примесей (в основном газовых) и слиток нелегированного титана содержит порядка от 0,5 до 1,0 % примесей. Такой титан в иерархии чистоты металлов относится к технически чистым и в основном удовлетворяет требованиям, к титановым сплавам, предъявляемым промышленностью, как к конструкционным материалам общего назначения.

Для получения слитков титана и титановых сплавов используют различные виды плавки: вакуумно-дуговую плавку (ВДП), электронно-лучевую (ЭЛП), плазменно-дуговую (ПДП), индукционную (ИП), электрошлаковую (ЭШП) и гарнисажную, в том числе способ ГРЭ [1, 2].

Для использования в определенных целях (атомное машиностроение, производство сверхпроводящих материалов, монокристаллов для постоянных магнитов, распыляемых мишеней и т.д.) требуется титан высокой чистоты. Такой титан получают из технически чистого титана электролитическим и йодидным рафинированием, кристаллофизическими методами (зонной плавкой и методом Чохральского) [1, 2].

Самый распространенный вид плавки титана в мире – вакуумно-дуговая плавка (ВДП), которая отличается минимальным рафинирующим эффектом. Характерной особенностью ВДП с расходуемым электродом является ограниченная масса жидкой ванны металла и одновременное совмещение в её пределах процессов плавления и кристаллизации. Все примеси (металлические и неметаллические), вносимые в плавку с шихтой, растворяются в жидком титане или образуют в слитке тугоплавкие включения [3]. Повышение степени вакуума расширяет рафинирующие возможности вакуумно-дуговых печей.

Плавка в электронно-лучевых печах создаёт благоприятные возможности для проведения рафинирования и формирования плотного слитка. Процесс плавки титана осуществляется в вакууме, что исключает загрязнение металла примесями кислорода и азота из атмосферы печи. При ЭЛП происходит рафинирование титана от водорода, повышенное содержание которого приводит к хрупкости титана [5].

В Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины разработана технология выплавки титановых сплавов в вакууме методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ). В данном методе исходную шихту непрерывно подают в промежуточную емкость, где происходит плавление под действием электронных лучей, а затем жидкий металл сливается в кристаллизатор, где происходит регулируемое затвердевание расплава. Технология ЭЛПЕ имеет ряд значительных преимуществ перед традиционной технологией ВДП, в том числе она обеспечивает гарантированное удаление включений высокой (более 5 г/см³) и низкой (менее 4 г/см³) плотности [9].

Азот в титане находится не только как компонент твердого раствора, но и в виде неметаллических включений. Данные включения представляют собой твердые и хрупкие частицы, α -титана, насыщенного азотом, или частицы нитрида титана, получившие название «включения низкой плотности» (LDI). Эти частицы являются концентраторами напряжения и источниками зарождения усталостных трещин. Помимо азотсодержащих включений LDI, в слитках титана могут быть включения осколков твердосплавного инструмента, вносимые с шихтовыми материалами (стружкой), которые имеют высокую температуру плавления и большую плотность и получили название «включения высокой плотности» (HDI).

В отличие от ВДП, перегрев металла и продолжительность его нахождения в жидком состоянии в промежуточной ёмкости при ЭЛПЕ являются основными факторами, определяющими возможность рафинирования титана от твердых включений. Механизм удаления дефектов при ЭЛПЕ заключается в осаждении включений с высокой плотностью и растворении азотсодержащих включений с низкой плотностью [10].

Печь с рафинирующим подом для очистки титана от тяжелых металлических и легких оксинитридных включений заявлена в патенте США [15]. Под содержит открытую емкость, разделенную на три зоны, первая и третья из которых имеют заданную глубину и сообщаются между собой посредством второй зоны, глубина которой меньше, чем у первой и третьей зон.

В другом патенте США [16] заявлена электроннолучевая печь для рафинирования титана и разливки его в слитки. Печь имеет плавильный и транспортировочный водоохлаждаемые горны, несколько электронных пушек, водоохлаждаемую вакуумную камеру и кристаллизатор, из которого вытягиваются слитки. Горны и кристаллизатор разделены между собой порогами. По мере прохождения расплавленного титана от плавильного горна до кристаллизатора примеси испаряются.

Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности [18] разработал технологическую схему получения титана высокой чистоты, сочетающую электролитическое рафинирование титана губчатого или отходов титана с электронно-лучевым рафинированием полученного электролитического порошка в глубоком вакууме.

Плазменно-дуговую плавку титана также можно рассматривать как рафинирующий переплав (ПДРП). Наряду с ЭЛПЕ, плазменно-дуговая плавка является наиболее перспективной технологией удаления из титана азотсодержащих включений, поскольку позволяет перегревать поверхность расплава до 200 °С выше температуры плавления, а в отдельных зонах и выше, и кроме того, дает возможность поддерживать металл в жидком состоянии любое необходимое время [21].

В процессе переплава титанового лома методом плазменно-дугового переплава получают слитки с гораздо меньшим содержанием газовых примесей (водорода и азота) по сравнению с исходной шихтой. Анализы химического состава слитков, полученных плавкой отходов сплава Т1-6А1-4У на экспериментальной плазменной печи с использованием гелия в качестве плазмообразующего газа, показали, что содержание водорода и азота в полученных слитках значительно снизилось по сравнению с исходной шихтой [23, 24, 25].

Переплав отходов титана губчатого с повышенным содержанием хлоридов показал, что при содержании хлоридов в титане губчатом до 0,25 % целесообразна ПДП, а при более высоком содержании хлоридов предпочтительнее является индукционная плавка [26].

Применение технологии индукционной плавки в секционном кристаллизаторе для переплава титана губчатого с повышенным содержанием хлора показало, что при оптимальных электрических параметрах возможно стабильное проведение процесса плавки. Содержания азота и железа в полученных слитках почти не изменились, а содержание кислорода по сравнению с исходной шихтой снизилось в 2-3 раза.

Электрошлаковая плавка (ЭШП) была разработана в СССР в начале 50-х годов, с целью получения качественных сталей как рафинирующий переплав. Далее

электрошлаковый переплав был заявлен как метод очистки титана от азота [28]. ЭШП позволяет эффективно растворять нитридные включения [29].

Применение электрошлаковой технологии к плавке титана предусматривает применение камерных печей (КЭШП), работающих в защитной или инертной среде с активными металлосодержащими флюсами (например, $\text{CaP}_2\text{-Ca}$) [31, 32] для рафинирования титановых сплавов от обогащенных азотом включений (ОАВ). Использование кальцийсодержащего флюса позволяет создать требуемые термодинамические условия для разложения ОАВ в процессе КЭШП.

КЭШП позволяет перерабатывать отходы титанового производства в виде счисток титана губчатого с крышек реторт в кондиционные слитки, причем введение в процессе переплава счисток в шлак металлического кальция обеспечивает рафинирование титана от азота и кислорода [33, 38].

Современные виды плавки шихты различного состава, в том числе содержащие лом и отходы, позволяют получать слитки титановых сплавов повышенной чистоты. Плавильное производство российской компании ОАО «Корпорация ВСППО-АВИСМА» для выпуска титановых полуфабрикатов роторного назначения, помимо традиционной технологии ВДП, использует все плавки в печах с холодным подом, располагая электронно-лучевой установкой, плазменно-дуговой печью и двумя гарнисажными дуговыми печами типа ГРЭ. В настоящее время приоритет среди печей с холодным подом принадлежит гарнисажно-дуговым печам [40, 41].

1.3.1 Получение высокочистого титана

В промышленных масштабах для достижения данной цели используют электролитическое рафинирование и йодидный процесс. Электролитическое рафинирование используется для получения из низкосортного титана губчатого и отходов сплавов качественного продукта в виде порошков регулируемой крупности.

Электролитическое рафинирование значительно повышает чистоту титана по газовым примесям (азоту и кислороду), а также железу, углероду, кремнию и некоторым другим примесям. В основном в качестве электролита используется солевой расплав на основе эквимольной смеси NaCl-KCl , содержащей необходимое количество низших ионов титана [47]. При оптимальном режиме электролиза (температура 900 °С, концентрация ионов $\text{TP}+6\%$, плотность тока 0,5 А/см²) получен титан чистотой 99,95 % (исходная чистота составляла 98,65 %).

Технология йодидного рафинирования дает продукт, значительно более чистый, чем титан губчатый, по примесям азота, кислорода и магния. Метод йодидного рафинирования титана основан на обратимости реакции образования и термической диссоциации газообразного тетраиодида титана. Результат глубокой очистки титана от примесей в этом процессе достигается за счёт различия в физико-химических свойствах, в первую очередь, энергии Гиббса [11], образования соответствующих йодидов, а также кинетических факторов, которые зависят от скоростей взаимодействия основного металла, температур и примесей с йодом.

В основном, чистота йодидного титана составляет 99,9-99,95 %. Термодинамический анализ процесса получения высокочистого титана йодидным методом позволил определить необходимые режимы образования и разложения $TiCl_4$, при этом температура образования составляет 800-900 К, разложения 1300-1500 К [52]. При соблюдении этих режимов был получен титан чистотой 99,995 %.

Высокочистый титан также может быть получен, если операции йодирования предшествуют или следуют за ней другие рафинировочные технологии. Так, в патентах США [53,54] йодидному рафинированию подвергали катодные кристаллы титана, полученные электролитическим рафинированием металлотормического титана губчатого. Чистота катодного металла составляла 99,9999 %. Такой металл переплавляли в электронно-лучевой печи, полученный слиток подвергали йодидному рафинированию. В данном случае йодирование вели при температуре 750 °С, а разложение йодида при 1300-1400 °С.

Наиболее чистый титан получают методом зонной плавки (перекристаллизации). Узкую расплавленную зону при бестигельной зонной плавке вертикально установленного титанового прутка, производят индуктором или электронным лучом. Последнее более предпочтительно, поскольку при электронно-лучевом нагреве возможно получить больше тепла на единицу площади и иметь более узкую зону плавления.

1.3.2 Вакуумно-дуговая плавка

Новые области применения титана – медицинская, строительная промышленность и производство товаров широкого потребления, связаны с применением сплавов титана. Следует отметить, что лишь около 5 % титанового сырья, которое на сегодняшний день добывается в мире, перерабатывается в металлический титан [2]. Несмотря на это сплавы титана, имеют важнейшее значение для многих отраслей промышленности.

При этом следует отметить, что в основном находят применение не чистый титан, а его сплавы, так как они обладают прочностью в 4-5 раз превосходящей прочность титана полученного йодидным методом.

Основными способами переработки губчатого титана в слитки являются вакуумно-дуговой переплав (ВДП) и электронно-лучевая плавка (ЭЛП). Данные процессы являются основными для получения титановых сплавов.

Технология вакуумно-дугового переплава широко используется для улучшения чистоты и структуры стандартных слитков, которые называются расходуемыми электродами, выплавленных в атмосфере либо в вакууме по технологии индукционной плавки.

При вакуумно-дуговом переплаве под воздействием высоких температур, возникающих в зоне электрической дуги между переплавляемым электродом и поддоном кристаллизатора, металл на нижнем торце электрода расплавляется и капли расплавленного металла попадают в ванну, где под воздействием охлаждения

кристаллизатора формируется слиток. Перед началом операции плавки печь вакуумируют. Вакуумирование печи поддерживается в течение всей плавки. Таким образом, капли металла падают через вакуумированное пространство, при этом обеспечивается глубокое очищение металла от газов, от примесей некоторых цветных металлов и получается плотный слиток. Кристаллизация металла в водоохлаждаемом медном кристаллизаторе имеет четко направленный характер, отвечающий направлению отвода тепла. В результате вакуумно-дугового переплава механические характеристики металла улучшаются и становятся однородными в различных направлениях слитка.

В вакуумных дуговых печах отсутствует огнеупорная футеровка, а все элементы печи, подверженные воздействию высоких температур, охлаждаются водой. В связи с этим в них можно проводить процессы, требующие высоких температур и большой концентрации тепла.

На вакуумных дуговых печах широко применяется автоматизация, охватывающая собой автоматическое регулирование процесса горения дуги, длины дуги, а также формирование слитка. Это обеспечивает получение качественного слитка.

К примеру, немецкой компанией ALD разработана специальная система автоматического контроля плавки АМС, осуществляющая строгий контроль над всеми параметрами процесса. Функция логического контроля, постоянное взвешивание расходуемого электрода, регулирование по замкнутому циклу (например, скорость плавки, дуговой промежуток на основе напряжения дуги или скорость падения коротких импульсов), сбор и управление данными осуществляются компьютерной системой. Компьютер для связи оператора с установкой (OIP) иерархически является задающим устройством системы автоматического контроля плавки (АМС). OIP служит для визуализации процесса, графического отображения и функциональных клавиш для команд оператора, представления данных процесса, редактирования и управления методиками плавки, сбора и хранения данных, а также для создания отчетов по плавке. Все установленные параметры плавки сохраняются на жестком диске.

1.4 Экономическая аналитика титанового производства в целом, сравнительные характеристики с мировым производством

По аналитическим данным в 2013 году 39 компаний в мире производили титановые сплавы, 21 из которых находилась в Китае. В 2019 году количество компаний в мире, производящих титановые сплавы, увеличилось до 70 (+79 %). При этом 52 компаний являются китайскими производителями. Диаграмма производственной мощности титановых слитков и сплавов в разрезе стран, в период с 2000-2019 гг. представлена в Приложении А.

Российские производственные мощности титановой промышленности в период с 2000 г. по 2019 г. изменялись больше всех компаний в мире, в связи с

резкими перепадами объемов производства продукции ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

Наиболее часто используемая технология получения титановых слитков и сплавов – это плавка методом вакуумно-дугового переплава (ВДП). Согласно аналитическим оценкам, от общего количества произведенных титановых слитков и сплавов более 37 тыс. тонн в год или около 69 % были получены методом ВДП. Также наряду с методом ВДП в мировой практике в Китае, Франции, Италии, Индии, Японии и США используются и другие технологии производства титановых слитков и сплавов, такие как: электронно-лучевая плавка (ЭЛП), плазменно-дуговая плавка (ПДП), индукционно-гарнисажная плавка (ИГП).

Метод ЭЛП в основном применяется для производства слитков и сплавов с использованием в качестве входного сырья не только титана губчатого, но и титанового лома. Мощность производства слитков и сплавов методом ЭЛП в мире составляет не менее 124,7 тыс. тонн в год. Метод ЭЛП широко применяется в США, Украине, Японии, Китае и Казахстане.

Мощность производства титановых слитков и сплавов методом ПДП в мире [2] оценивается в 26,8 тыс. тонн в год. ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» использует метод ИГП. Диаграмма производственных мощностей стран по используемым технологиям получения титановых сплавов показана в Приложении Б.

ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», находится в городе Верхняя Салда (Российская Федерация). Данная компания имеет самую большую плавильную мощность производства титановых сплавов в мире – 72 тыс. тонн в год. ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» использует оборудование ВДП, ИГП, ПДП и ЭЛП для плавки титана губчатого и лома в слитки, сплавы и слябы.

Американская компания «TIMET» (дочерняя компания Precision Castparts) является второй компанией в мире с плавильной мощностью по производству титановых слитков и сплавов – 70,3 тыс. тонн в год. Заводы этой компании расположены в США – мощность 56,6 тыс. тонн титановых слитков и сплавов в год, в Великобритании – мощность 10,7 тыс. тонн в год, во Франции – мощность 3 тыс. тонн в год. Заводы компании TIMET используют методы: ВДП – 37,3 тыс. тонн титановых слитков и сплавов в год, ЭЛП – 32,1 тыс. тонн в год и ПДП – 1,8 тыс. тонн в год.

Американская компания «Allegheny Technologies» (ATI) занимает третье место в мире по производству титановых слитков и сплавов, производительностью 44,1 тыс. тонн в год. Завод в городе Олбани имеет мощность 10,9 тыс. тонн в год. Завод в городе Монро имеет мощность 23,2 тыс. тонн в год, из них методом ВДП – 13,2 тыс. тонн в год и методом ПДП – 10 тыс. тонн в год. Завод в городе Ричленд имеет мощность по производству титановых слитков, сплавов и слябов – 10 тыс. тонн в год.

Производственная мощность компании «Arcorpic» в США по выпуску титановых слитков и сплавов составляет 35 тыс. тонн в год. Данная компания имеет три завода в США. На данных заводах применяются методы производства

титановых слитков и сплавов: ВДП – мощностью 25,4 тыс. тонн в год, ПДП – мощностью 6 тыс. тонн в год и ЭЛП – мощностью 3,6 тыс. тонн в год.

В Японии компания «Kobe Steel» запустила свою первую печь ВДП производственной мощностью 1,2 тыс. тонн в год в городе Такасаго в 1959 году. К 1981 году мощность была увеличена до 7,2 тыс. тонн титановых слитков и сплавов в год, к 1997 году до 10 тыс. тонн в год. Последнее увеличение мощности произошло в 2008 году, и теперь завод имеет четыре печи ВДП, две мощностью 8,5 тыс. тонн в год и две мощностью 6,5 тыс. тонн в год, что дает совокупную мощность в 30 тыс. тонн в год.

Японская компания Toho Titanium имеет производственную мощность титановых слитков и сплавов 27,6 тыс. тонн в год. Титановое производство расположено на трех производственных площадках, включающих 24,6 тыс. тонн титановых слитков и сплавов в год методом ЭЛП и 3 тыс. тонн в год методом ВДП.

Компания Osaka Titanium имеет мощность 6 тыс. тонн титановых слитков и сплавов в год методом ВДП, на своем заводе в городе Амагасаки (Япония).

Японская компания Nippon Steel & Sumikin Naoetsu Titanium имеет мощность 5,5 тыс. тонн титановых слитков и сплавов в год. Компания Daido Steel имеет производственную мощность 1,5 тыс. тонн в год.

В Китае, компания Baoji Titanium имеет мощность 30 тыс. тонн в год. Данная компания использует метод ВДП – мощностью 27 тыс. тонн в год и метод ЭЛП – мощностью 3 тыс. тонн в год.

Компания Northwest Institute for Nonferrous Metal Research (NIN) является вторым по величине внутренним производителем слитков и сплавов в Китае – мощностью 17 тыс. тонн в год. Данная компания имеет три дочерних компаний: 1) Компания Western Metal Materials (WMM) имеет мощность 8 тыс. тонн в год. 2) Компания Western Superconducting Technologies с мощностью 6 тыс. тонн в год. 3) Компания Western Titanium Technologies с мощностью 3 тыс. тонн в год.

Китайская компания Yunnan Titanium Industry имеет производственную мощность 15 тыс. тонн титановых слитков и сплавов в год, из которых 8 тыс. тонн в год производится методом ЭЛП и 7 тыс. тонн в год методом ВДП.

Производственная мощность компании Tiangong International составляет 10 тыс. тонн титановых слитков и сплавов в год, которые выплавляются методом ВДП. Аналогичная мощность в 10 тыс. тонн в год у компании Baoshan Iron and Steel, из них методом ВДП производится 8 тыс. тонн в год, методом ПДП – 1 тыс. тонн в год и методом ЭЛП – 1 тыс. тонн в год. Еще один китайский производитель – компания Qinghai Supower Titanium выпускает 8 тыс. тонн титановых слитков и сплавов в год методом ЭЛП.

Общая мощность производителей Китая составляет 191,2 тыс. тонн титановых слитков и сплавов в год. Из них методом ВДП – 167 тыс. тонн в год, методом ЭЛП – 23,2 тыс. тонн в год и методом ПДП – 1 тыс. тонн в год.

На Украине, пять компаний имеют суммарную производственную мощность ЭЛП в 12 тыс. тонн титановых слитков и сплавов в год. Компания Antares имеет крупнейшую производственную мощность в 5 тыс. тонн в год, компания Strategy

ВМ мощностью – 4 тыс. тонн в год и компания SPC Titan мощностью – 3 тыс. тонн в год.

АО «УКТМК» имеет производственную мощность в 9 тыс. тонн титановых слитков и сплавов в год при использовании метода ВДП и дополнительную мощность в 6 тыс. тонн в год при использовании ЭЛП.

В Приложении В изображена диаграмма, представляющая информацию по странам-производителям, экспортирующим титановую продукцию.

Подводя итог, можно отметить, что из всех вышеперечисленных стран – производителей титановых слитков и сплавов наибольшую мощность имеет Китай – 191,2 тыс. тонн в год, причем преобладающим методом производства является метод ВДП. Второй страной по величине производственной мощности являются США – 140,7 тыс. тонн в год, из них 75,6 тыс. тонн – методом ВДП. На третьем месте Российская Федерация с 79 тыс. тонн титановых слитков и сплавов в год. При этом ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» является компанией с самой высокой производственной мощностью в мире – 72 тыс. тонн в год, из них 54 тыс. тонн в год методом ВДП. Еще одним крупным мировым производителем титановых слитков и сплавов является Япония с общей производственной мощностью 70,6 тыс. тонн в год, больше половины из которых выплавляется методом ВДП – 43,5 тыс. тонн в год. На долю Украины и Казахстана приходится практически равное количество производимой продукции – 15,6 и 15,0 тыс. тонн в год соответственно, при этом весь объем Украинской продукции выплавляется методом ЭЛП. В Казахстане же преобладает метод ВДП – 9 тыс. тонн в год.

1.5 Компании - титановых изделий Сафран и Ауберт Дюваль, Франция

Французская компания Сафран разрабатывает, производит и поддерживает системы посадки и торможения для всех типов самолетов. Область работ Сафран охватывает весь жизненный цикл продукта, от проектирования и разработки до производства и поддержки. Компания является ведущим мировым производителем шасси, мировым поставщиком авиационных колес и карбоновых тормозов, также осуществляет техническое обслуживание, ремонт систем рулевого управления, торможения и контроля. Более чем 60 тысяч авиационных посадок в день выполняется благодаря системе, разработанной в компании Сафран.

Еще одна французская компания, которая также является лидером в области производства кованых деталей, заготовок авиационного и аэрокосмического применения это – Ауберт Дюваль. Данная компания входит в тройку ведущих производителей штампованных деталей для авиационных и космических конструкций, шасси, двигателей, турбин и обеспечивает потребность в кованых деталях, штамповок, прокатки европейских лидеров авиации.

В 2019 году АО «УКТМК» совместно с компаниями Сафран и Ауберт Дюваль подписали трехстороннее соглашение по разработке, производству и внедрению технологии выпуска сплавов марки Ti-10-2-3. Данный вид сплава широко применяется в промышленных масштабах на заводах компаний Ауберт Дюваль и

Сафран для производства кованных изделий критического назначения в шасси и системы торможения самолетов.

В общей сложности проведены опытные плавки 20 титановых сплавов Ti-10-2-3, 17 из которых полностью соответствуют спецификациям компаний Сафран и Аубер Дюваль. Спецификации компаний Сафран и Аубер Дюваль включает требование к химическому составу, механическим свойствам, макро- и микроструктуре сплава. В сплаве не должно быть несплошностей, раковин, химической неоднородности. В макроструктуре и микроструктуре зерен не должно быть дефектов, неравномерное распределение элементов.

2 Экспериментальная часть

2.1 Характеристика исходных материалов и лигатуры и их влияние на физико-химические характеристики титанового сплава

В ходе исследования опытная работа проводилась на действующем оборудовании цеха по производству титановых слитков и сплавов: установке смешивания и шихтоподготовки, установке прессы с двойным усилием 80 МН, установке плазменной сварки электродов, печах ВДП, токарных станках для механической обработки, фрезеровки титановых сплавов.

Исследования проводились на опытных 20-ти титановых электродах: 1023/1, 1023/2, 1023/3, 1023/4, 1023/5, 1023/6, 1023/7, 1023/8, 1023/9, 1023/10, 1023/11, 1023/12, 1023/13, 1023/14, 1023/15, 1023/16, 1023/17, 1023/18, 1023/19, 1023/20. Электрод состоит из 60 брикетов, собираемых в 30 слоёв. Вес электрода 4500 кг. Длина электрода – 6510 мм, диаметр 500 мм.

2.1.1 Подбор шихтовых материалов

Для производства опытных сплавов использовалась лигатура V:Al:Fe с распределением компонентов 69:19:12 соответственно, производства компании GFE; лигатура V:Al:C с распределением компонентов 65:34:1 соответственно, производства компании GFE; диоксид титана TiO_2 производства компании Tronox; Al гранулы производства Oelshlager и Fe порошок производства Hoeganas – элементы в чистом виде.

Характеристики используемого сырья и материалов при производстве представлены в Приложении Г.

2.1.2 Структурные свойства сплава Ti-10-2-3

На образование структуры и механических свойств титановых сплавов значительное влияние оказывают фазовые превращения, связанные с полиморфизмом титана. Легирующие элементы, введенные в титан, растворяются в тех фазах, в которых они увеличивают силы межатомного взаимодействия и повышают их относительную стабильность в той или иной фазе (α -фазы, β -фазы), которая определяется температурой полиморфного превращения (ТПП) [2].

Элементы, входящие в состав исходных материалов, такие как Al, O, C и N повышают температуру полиморфного превращения. Эти элементы растворяются в α -фазе, повышают константы упругости твердого α -раствора и расширяют температурный интервал существования α -фазы. Данные элементы (O, N, C) присутствуют в составе титана губчатого, легирующих компонентов (C, Al) [4].

Наряду с данными элементами, также существуют элементы, понижающие температуру полиморфного превращения: V, Fe. Эти элементы растворяются в β -

фазе, увеличивают константы упругости β -раствора и расширяют температурный интервал существования β -фазы.

Также атом титана может переходить из β -фазы в α -фазу. В Приложении Д представлена схема перехода атома титана из β -фазы в α -фазу [4].

Количественное влияние на изменение температуры полиморфного превращения при легировании титанового сплава элементами представлена в Приложении Е.

Алюминий имеет низкую плотность и поэтому уменьшает удельный вес сплавов и тем самым повышает удельную прочность, а также эффективно упрочняет титановые сплавы всех классов при сохранении удовлетворительной пластичности.

К недостаткам введения алюминия можно отнести уменьшение технологической пластичности и ударной вязкости.

Особенно резкое падение пластичности наблюдается в сплавах при содержании более 7,0 % из-за образования сверхструктуры α_2 .

Поэтому состав конструкционных титановых сплавов выбирается таким образом, чтобы избежать образования интерметаллида Ti_3Al (α_2 -фазы). Это достигается за счет ограничения содержания алюминия и путем добавок β -стабилизаторов, таких как Mo и V [2].

Ванадий самый распространенный из легирующих β -стабилизаторов в титановых сплавах. Повышая прочность, он также повышает и пластичность (единственный β -стабилизатор с таким свойством). По сравнению с другими β -стабилизаторами ванадий имеет большую растворимость и в α -титане (до 3 %). Это дает возможность создавать сплавы, сочетающие преимущества однофазных α -сплавов (хорошая свариваемость) и двухфазных (способность к упрочняющей термической обработке).

Повышение прочности и твердости при легировании кислородом значительно сильнее, чем алюминием, так как он образует твердый раствор внедрения. За счет этого же существенно снижается технологичность.

Кроме того, при содержании кислорода более 0,2 % и нагреве сплава в районе температуры полиморфного превращения на границах зерен α -фазы возможно образование сегрегаций кислорода или даже мелких частиц α -фазы, более обогащенных кислородом, чем матричный твердый раствор. Все это сильно снижает пластичность и ударную вязкость.[11], [5].

2.2 Термодинамическое обоснование получения сплавов Ti-10-2-3

Для теоретического обоснования с точки зрения термодинамики были построены диаграммы состояния Ti-V-O, Ti-Fe-Al, Ti-Fe-O, Ti-Al-O в интервале температур 200-3000 °C, рисунки 1-4.

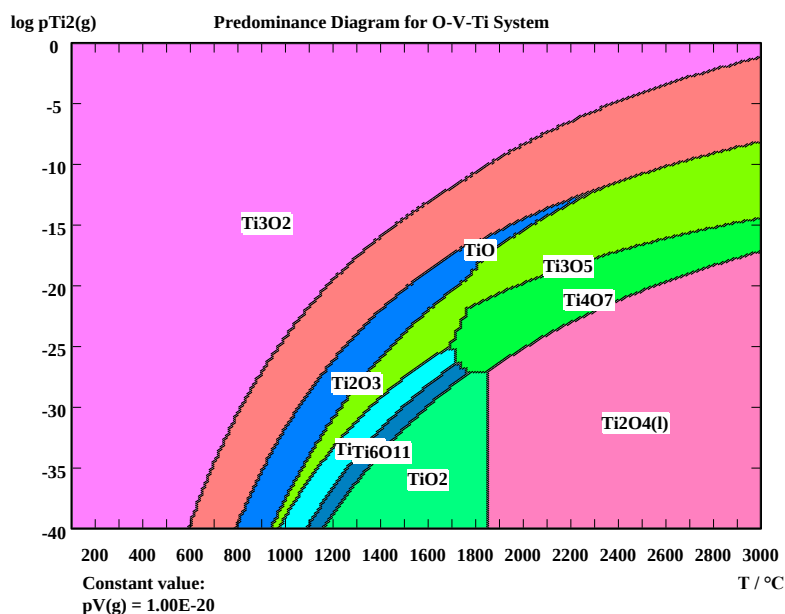


Рисунок 1 – Диаграмма равновесного состояния Ti-V-O

Согласно результатам анализа диаграммы равновесного состояния Ti-V-O определены устойчивые состояния оксидов титана в области высоких температур от 1800 до 3000 °C, рисунок 1.

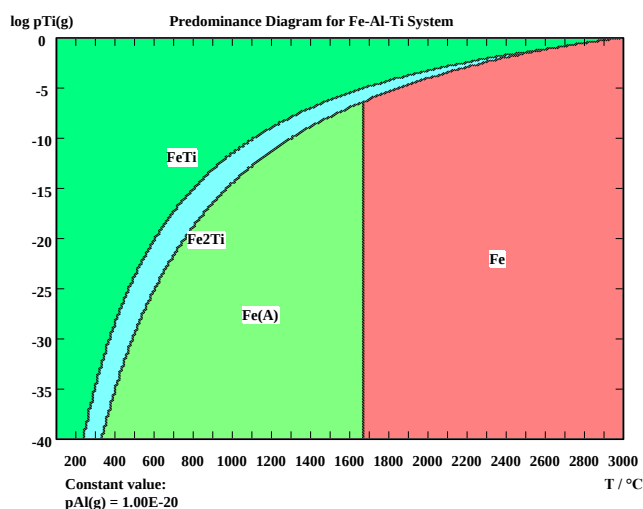


Рисунок 2 – Диаграмма равновесного состояния Ti-Fe-Al

Результатами анализа диаграммы равновесного состояния Ti-Fe-Al определены устойчивые состояния Fe_2Ti , Fe_2Ti и элементного состояния Fe. В области высоких температур от 1600 до 3000 °C преобладающее состояние имеет железо, рисунок 2.

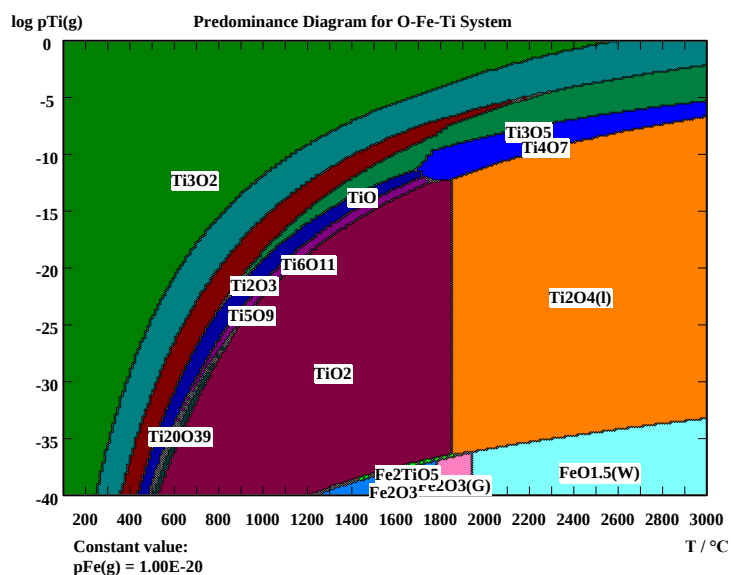


Рисунок 3 – Диаграмма равновесного состояния Ti-Fe-O

Данная диаграмма представляет наибольший интерес, т.к. нет достаточных данных по фазовым равновесиям в области высокого содержания кислорода, а также в условиях существования металла с высоким содержанием титана. Установлено, что в системе Ti-Fe-O в интервале температур 1373-1873 °C существуют тройные соединения такие как: FeTiO_3 (ильменит), Fe_2TiO_4 (ульвошпинель). Образуется Fe_2TiO_5 (ферропсевдобрукит) при температурах выше 1600 °C, далее образуется вещество состава FeTi_2O_5 , возможно, что данное вещество образуется из раствора Ti_3O_5 , которое имеет достаточно большую область гомогенности на диаграмме от 1600 °C до 3000 °C. Установлено, что химические соединения этой системы образуют ряд твердых растворов и неограниченно растворяются друг в друге гематит, ильменит. Вюститная фаза имеет переменный состав по кислороду. Практически все оксидные фазы в определённых условиях и состояниях могут находиться в равновесии с практически чистым железом.

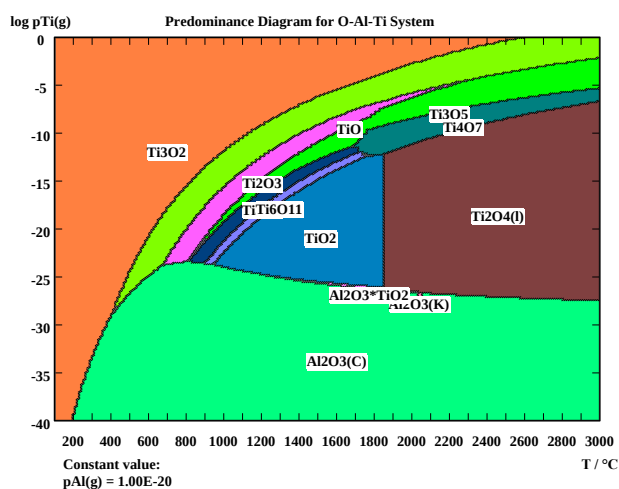


Рисунок 4 – Диаграмма равновесного состояния Ti-Al-O

Результатами анализа диаграммы равновесного состояния Ti-Al-O определены устойчивые состояния Ti_2O_3 , Ti_4O_7 , Ti_2O_4 . В области высоких температур от 1600 до 2000 °С фиксируется тройное соединение $Al_2O_3 \cdot TiO_2$ рисунок 2.

Данные диаграммы доказывают возможность производства металлического титана, его соединений, а также образования устойчивых тройных соединений сплавов на основе титана.

2.3 Описание и характеристики оборудования

Плавка слитков и сплавов производится в вакуумных дуговых печах ВДП типа L 1150 P17 Ti, показанных на Рисунке 1. Схема печи ВДП приведена на Рисунке 3.

Печь ВДП предназначена для выплавки титановых сплавов в двух неподвижных плавильных станциях попеременно. Сплавы производятся из расходующихся электродов. Для каждого диаметра сплава должен быть отдельный кристаллизатор.



Рисунок 5 – Печи ВДП типа L 1150 P17 Ti

Опора головной части печи представляет собой выдвижную вращающуюся конструкцию. Колонна привода печи располагается на колесах, приводящих в движение всю конструкцию верхней части печи по дуговым рельсам между станциями плавки. Вакуумная камера поддерживает всю систему подачи электродов. Система подачи электродов, а также приводная система электродов и двухкоординатная (в осях XY) угловая регулировка располагаются на трех тензодатчиках, расположенных на верху вакуумной камеры (камера печи) для непрерывного взвешивания электрода в процессе переплава.

Электрод соединяется с плунжерным электрододержателем (штоком) при помощи пневматически контролируемого зажима.

Система подачи тока высокого напряжения имеет соосную форму, включающую охлаждаемые водой кабели питания между выпрямителями и контактами на головной части печи. Два симметрично расположенных охлаждаемых водой шинопровода, соединяют положительный полюс с верхом камеры печи. Отрицательный полюс соединяется со штоком при помощи симметрично расположенных, охлаждаемых водой, кабелей электропитания. Камера печи служит

в качестве соосного проводника тока (положительная полярность) и использует в нижней части камеры устройство с массивным медным контактным фланцем для обеспечения точного соосного соединения с фланцем кристаллизатора через контактные фланцы запорного клапана.

Управление печи ВДП осуществляется оператором из диспетчерской с пульта управления, во время процесса плавки. Пример показан на Рисунке 6



Рисунок 6 – Диспетчерская для дистанционного управления процессом ВДП переплава

Автоматическая система контроля плавки позволяет автоматически управлять установкой ВДП в соответствии с методикой плавки после начала процедуры запуска процесса.

На Рисунке 7 показана схема печи ВДП.

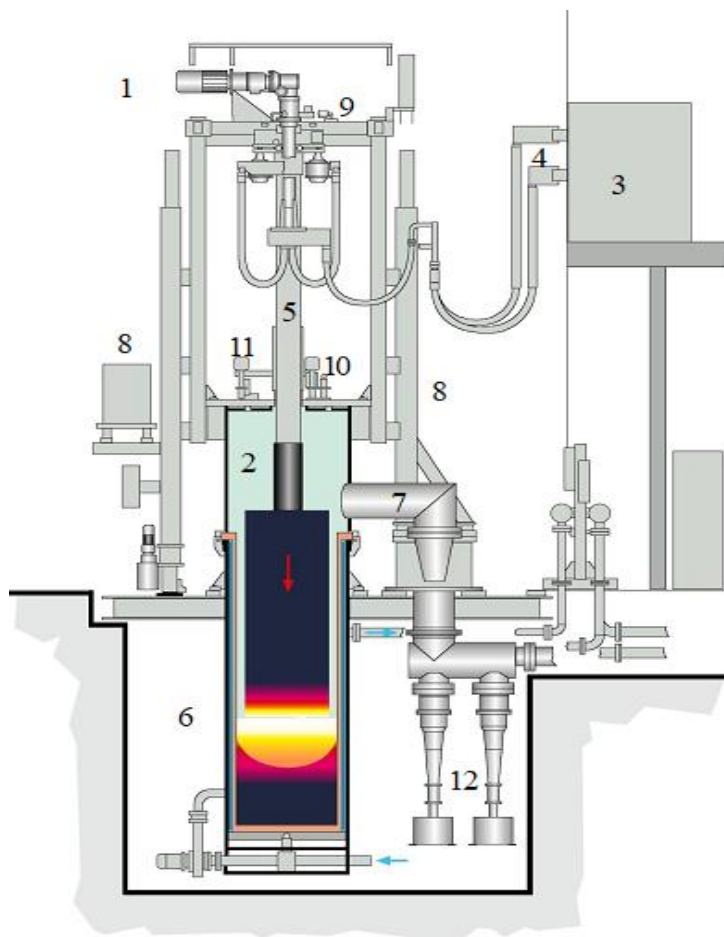


Рисунок 7 – Схема печи ВДП

1. привод подачи электрода; 2. камера печи; 3. источник питания плавки; 4. шина и кабеля; 5. плунжерный электрододержатель; 6. водяная рубашка с кристаллизатором; 7. вакуумный канал; 8. поворотная колонна; 9. система координатной регулировки; 10. система тензодатчиков; 11. система ТВ камеры; 12. маслобустерные насосы.

2.4 Методика проведения экспериментов, условия и технологические параметры получения титановых сплавов Ti-10-2-3.

2.4.1 Составление и программирование расчёта шихтовых материалов

При плавке разных марок сплавов (спецификаций) используются соответствующие значения технологических параметров. На титановый сплав Ti-10V-2Fe-3Al имеются спецификации MTL-3105 компании Сафран (Франция) и AQA-5102 компании Ауберт Дюваль (Франция). Требования данных спецификаций приведены в Приложении Ж.

Так как, вся продукция, производимая из титановых сплавов по двум данным спецификациям, используется для производства ответственных деталей шасси

авиационной техники, для АО «УК ТМК» является приоритетным освоение производства сплавов Ti-10V-2Fe-3Al.

Освоение производства титановых сплавов Ti-10V-2Fe-3Al заключается в определении оптимальных технологических параметров в процессе плавки на существующем оборудовании. При этом ключевым параметром является скорость плавки, оказывающая значительное влияние на равномерность распределения элементов лигатуры в сплаве, которая в свою очередь регулируется напряжением и расстоянием между электродами и расплавом. В качестве базовых технологических параметров плавки для сплава Ti-10-2-3 были приняты параметры выплавки наиболее близкого по химическому составу титанового сплава BT-6 (Ti-6Al-4V), производимого методом двойного вакуумно-дугового переплава. При этом, на основании практической закономерности более равномерного распределения легирующих элементов в сплаве при более низких скоростях плавки, на стадии третьего переплава плавка проводилась при сниженных скоростях.

Сравнение технологических параметров плавки сплава BT-6 и сплава Ti-10-2-3 представлены в Приложении И.

Сравнение параметров первого переплава стандартного сплава Ti-6Al-4V и сплавов марки Ti-10-2-3 показывает, что значение напряжения при первом переплаве Ti-10-2-3 в среднем выше на 2,5 В или на 7,62 %, при втором переплаве в среднем ниже на 2,36 В или на 7,87 %. Сила тока в среднем ниже на 0,5 кА или 2,5 % при первом переплаве Ti-10-2-3 и на 4,5 кА или 30 % при втором. Скорость плавки первого переплава Ti-10-2-3 в среднем ниже на 4,15 кг/мин или 37,61 %, второго – на 0,76 кг/мин или 8 %, чем скорость плавки Ti-6Al-4V. По показаниям третьего переплава Ti-10-2-3 значения напряжения в среднем ниже на 5,26 В или 21,2 % первого переплава и на 7,86 В или 31,6 % второго переплава Ti-6Al-4V. Сила тока третьего переплава Ti-10-2-3 в среднем ниже на 14 кА или 215,38 % силы тока при первом переплаве Ti-6Al-4V и на 13 кА или 200 % при втором. Скорости плавки третьего переплава Ti-10-2-3 в среднем на 11,31 кг/мин или 306,5 % ниже первого переплава Ti-6Al-4V и на 7,07 кг/мин или 192,68 % второго.

Перед каждой плавкой составлены методики для загрузки шихтовых материалов и внесены в систему управления производственным процессом АСУТП «Level2».

Автоматическая система управления технологическими процессами Level 2 функционирует на основе математической модели процесса плавки титановых сплавов. Данная система была спроектирована компанией Интеко (Австрия) и внедрена для управления процессом производства, плавления титана и хранения технологических данных в цехе по производству титановых слитков и сплавов АО «УКТМК» в 2010 году. Исходными данными, вводимыми в систему, являются – химический состав исходного сырья и легирующих компонентов, режимные параметры технологического процесса плавки: сила тока, напряжение электрической дуги и скорость плавления.

Расчетный состав электродов, идентичный для всех экспериментальных титановых электродов: Al – 3,25 %, V – 9,7 %, Fe – 1,95 %, O – 0,105 %, C – 0,011 %. Расчетный состав электродов представлен в Приложении К.

2.4.2 Прессование брикетов

Ключевые параметры: масса одного брикета 75 кг, высота брикета 217мм.

Шихта, состоящая из исходных материалов и лигатуры, перемешивается в миксере, при вращении его вокруг своей оси. Перемешанная шихта подается в матрицу гидравлического пресса двойного действия, где происходит сжатие материала до достижения заданных размеров и формы. Готовые брикеты показаны на Рисунке 8. Готовые брикеты собираются на стяжном стержне, который используется для сжатия и удержания вместе собранных брикетов.



Рисунок 8– Готовые брикеты электрода

2.4.3 Сварка титанового электрода

Сварка брикетов титанового электрода производится на установке плазменной сварки. Сваренный электрод показан на Рисунке 9



Рисунок 9 – Электрод, сваренный на установке плазменной сварки

Ключевой параметр: содержание кислорода не более 0,004 %. В процессе плазменной сварки на поверхности электрода выполнены 8 продольных сварных шва с равномерным их распределением.

2.4.4 Проведение процессов вакуумно-дуговых переплавов

Время нахождения каждого губчатого электрода на открытом воздухе от момента окончания сборки до начала откачки ВДП на первый переплав – не более 24 часов. Приварка электрододержателей, диаметром 250 мм, осуществлялась в печах ВДП, с выдержкой времени охлаждения приварки – не менее 60 минут под остаточным давлением (ключевой параметр).

Первый переплав экспериментальных электродов проходил в печи ВДП №3; второй переплав – в печи ВДП №4; окончательный (третий) – в печи ВДП №2, без привязки к определённой плавильной станции. Стартовый материал не применялся.

В Таблице 1 указаны названия методик, используемых для производства экспериментальных сплавов.

Таблица 1 – Методики плавления экспериментальных сплавов марки Ti-10V-2Fe-3Al

Номер сплава	1023/1	1023/2	1023/3	1023/4
Методика 1го переплава ВДП № 3	Test 1023 2В 500/14	Test 1023 2В 500/8	Test 1023 2В 500/14	Test 1023 2В 500/10

Методика 2го переплава ВДП № 4	Test 1023 H2 590/12	Test 1023 H2 590/8	Test 1023 H2 590/12	Test 1023 H2 590/8
Методика 3го переплава ВДП № 2	Test 1023 H3 690/4	Test 1023 H3 690/4	Test 1023 H3 690/3.5	Test 1023 H3 690/3.5

Основной ключевой параметр – скорость плавления титанового сплава, был задан на каждый сплав индивидуально:

- для 1023/1: 14 кг/мин, 12 кг/мин, 4 кг/мин;
- для 1023/2: 8 кг/мин, 8 кг/мин, 4 кг/мин;
- для 1023/3: 14 кг/мин, 12 кг/мин, 3,5 кг/мин;
- для 1023/4: 10 кг/мин, 8 кг/мин, 3,5 кг/мин, соответственно на каждый из переплавов (1-й, 2-й, 3-й).

Остальные 16 сплавов также были сплавлены по методике 4-го сплава 1023/4: 10 кг/мин, 8 кг/мин, 3,5 кг/мин.

2.4.5 Первый переплав

Первый переплав производился в кристаллизаторе диаметром 620мм. Первый и третий электрод переплавлен с массовой скоростью 14 кг/мин, второй электрод с массовой скоростью – 8 кг/мин, четвертый – 10 кг/мин. Первые переплавы последующих 16 сплавов марки Ti-10V-2Fe-3Al были произведены по аналогии с 4-м сплавом 1023/4 марки Ti-10V-2Fe-3Al со скоростью плавления 10 кг/мин. Плавка произведена с оставлением остаточного диска высотой не менее 40 мм. Охлаждение 4-х экспериментальных сплавов первого переплава – 10 часов под остаточным давлением в камере печи ВДП (ключевой параметр).

Средняя скорость плавки в установившейся фазе плавления $7,2 \div 8,8 / 13,5 \div 16,5$ кг/мин для методик со скоростями плавки 8 и 14 кг/мин, $9,1 \div 10,9$ кг/мин для методик со скоростью плавления 10 кг/мин. Среднее напряжение в установившейся фазе плавления $29,5 \div 36$ В, периодичность работы соленоидной катушки плюс 2 минус 5 сек.

2.4.6 Второй переплав

Второй переплав производился в кристаллизаторе диаметром 700 мм. Первый и третий электрод переплавлен с массовой скоростью 12 кг/мин, второй и четвертый электрод с массовой скоростью – 8 кг/мин. Вторые переплавы последующих 16 сплавов были произведены также как на 4-м сплаве 1023/4 со скоростью плавления 8 кг/мин. Плавка произведена с оставлением остаточного диска высотой не менее 40 мм. Охлаждение 4-х экспериментальных сплавов второго переплава – 7 часов под остаточным давлением в камере печи ВДП.

Средняя скорость плавки в установившейся фазе плавления $7,2 \div 8,8 / 10,8 \div 13,2$ кг/мин для методик со скоростями плавки 8 и 12 кг/мин. Среднее напряжение в установившейся фазе плавления $29,5 \div 31,5$ В, периодичность работы соленоидной катушки плюс 5/ минус 5 сек.

2.4.7 Окончательный (третий) переплав

Третий переплав производится в кристаллизаторе диаметром 770 мм. Первый и второй электрод переплавлен с массовой скоростью 4 кг/мин, третий и четвертый электрод с массовой скоростью – 3,5 кг/мин. Третьи переплавы последующих 16 сплавов были произведены аналогично сплаву 1023/4 со скоростью плавления 3,5 кг/мин. Не допускаются перерывы во время установившейся фазы плавления и режима хот-топпинг (режим выведения усадочных раковин). Плавка с оставлением остаточного диска высотой не менее 40 мм (ключевой параметр). Охлаждение 4-х сплавов окончательного переплава – не менее 7 часов под остаточным давлением в камере печи ВДП.

Средняя скорость плавки в установившейся фазе $3,8 \div 4,2 / 3,3 \div 3,7$ кг/мин для методик со скоростями плавки 4 и 3,5 кг/мин. Среднее напряжение в установившейся фазе $24 \div 26,5$ В, периодичность работы соленоидной катушки плюс 3/ минус 3 сек. После перехода ВДП на установившуюся фазу плавления, не допускаются отклонения скорости плавления более, чем $3,6 \div 4,4 / 3,15 \div 3,85$ кг/мин; напряжения – $22,5 \div 27,5$ В. Длительность хот-топпинга – не менее 100 минут.

2.5 Физико-химические исследования полученного титанового сплава тройного переплава

От каждого экспериментального сплава для определения химического состава произведен отбор 4-х проб в зонах «верх», «середина 1», «середина 2», «низ» на боковой поверхности сплавов. Результаты химического анализа сплавов представлены в Приложении Л.

Химический состав проб отобранных от поверхности 4-х экспериментальных сплавов марки Ti-10V-2Fe-3Al соответствует спецификации материала.

В дальнейшем каждый из экспериментальных сплавов разделен на 3 части, с торцов каждой из частей отобраны по 17 проб для выполнения анализа распределения элементов по сечению сплава.

Первый срез выполнен на расстоянии 40 мм от верхней части сплава, второй срез из середины сплава в качестве образца установившегося режима плавления, третий срез выполнен на расстоянии 40 мм от нижней части. Схема деления сплавов на части приведена на рисунке 10.



Рисунок 10 – Схема разделения экспериментальных сплавов на части

Полученные результаты химических анализов проб с внутренних поверхностей экспериментальных сплавов на срезах приведены в Приложении М и на Рисунках 11, 12, 13, 14.

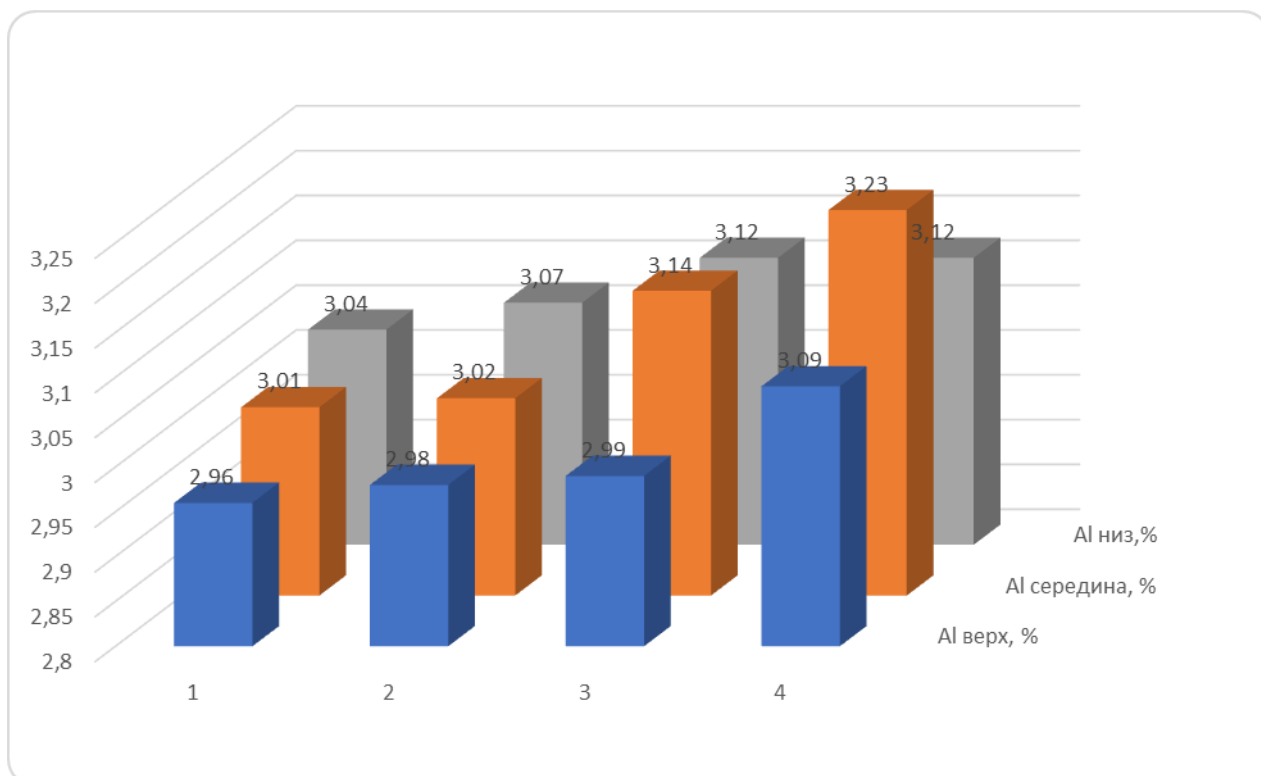


Рисунок 11 – Содержание алюминия (Al) в 4-х экспериментальных сплавах

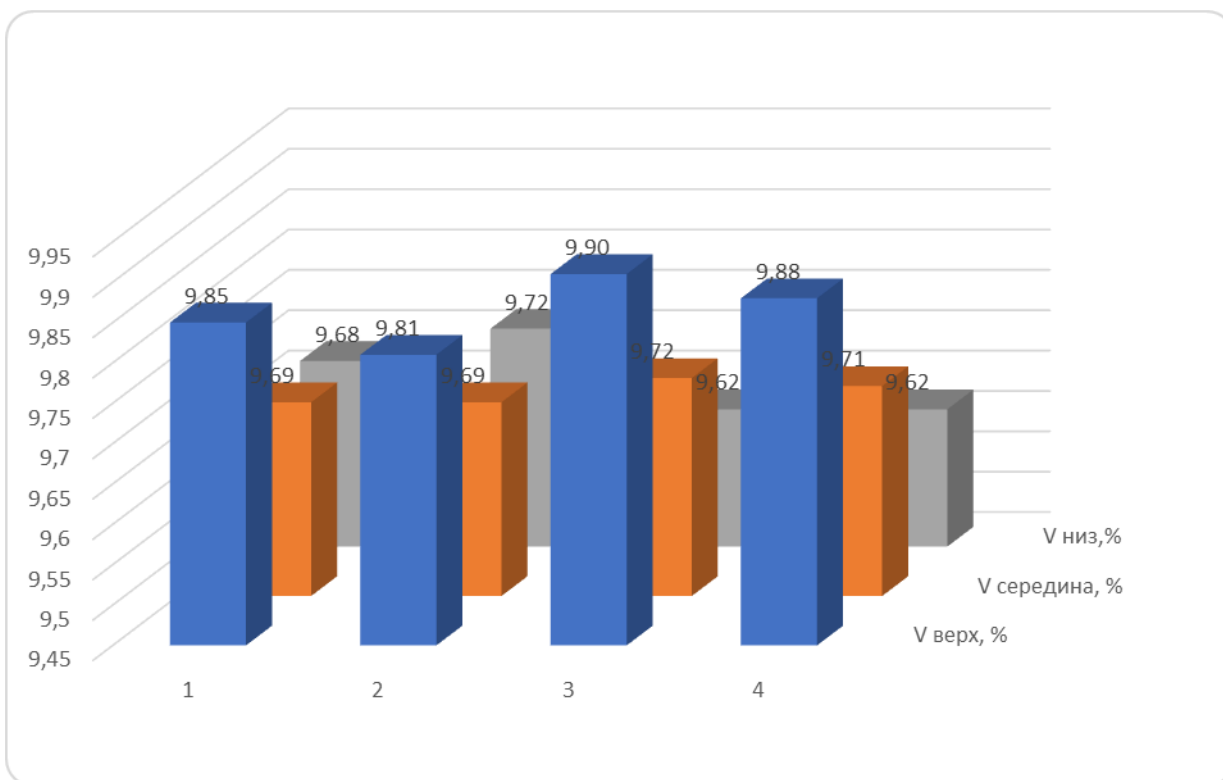


Рисунок 12 – Содержание ванадия (V) в 4-х экспериментальных сплавах

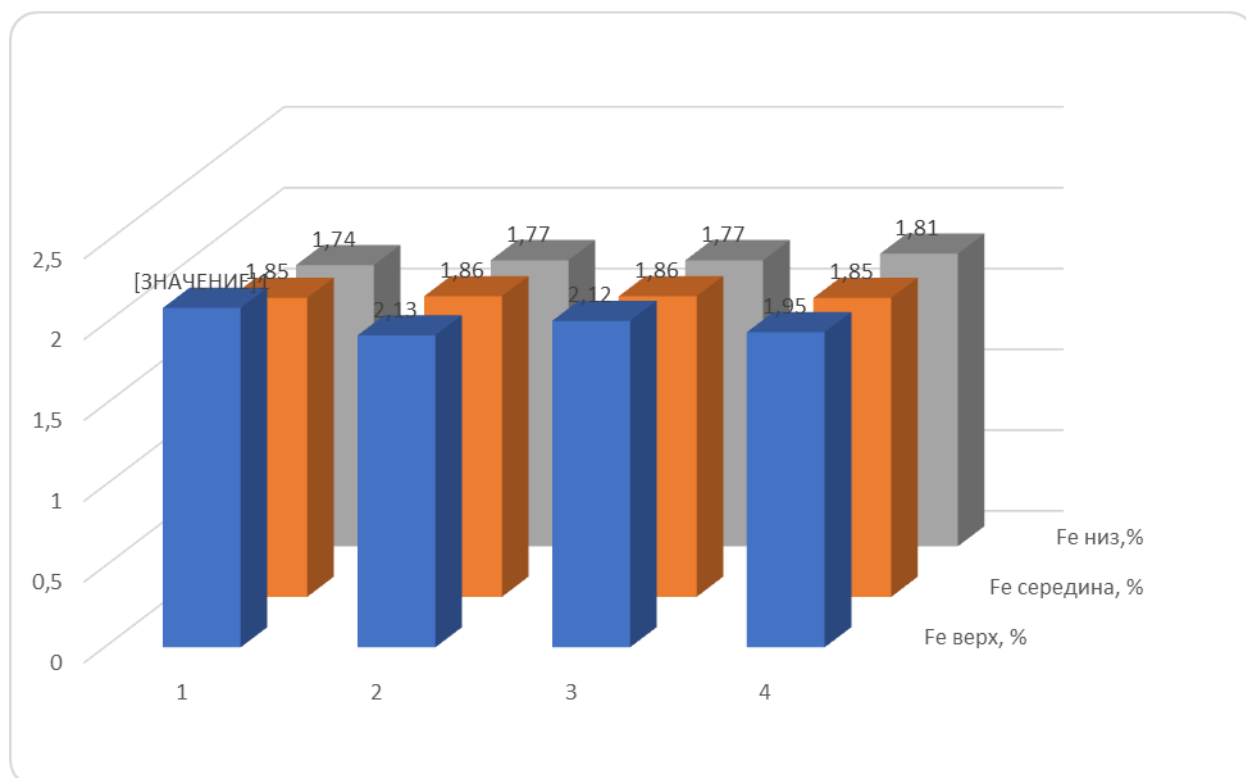


Рисунок 13 – Содержание железа (Fe) в 4-х экспериментальных сплавах

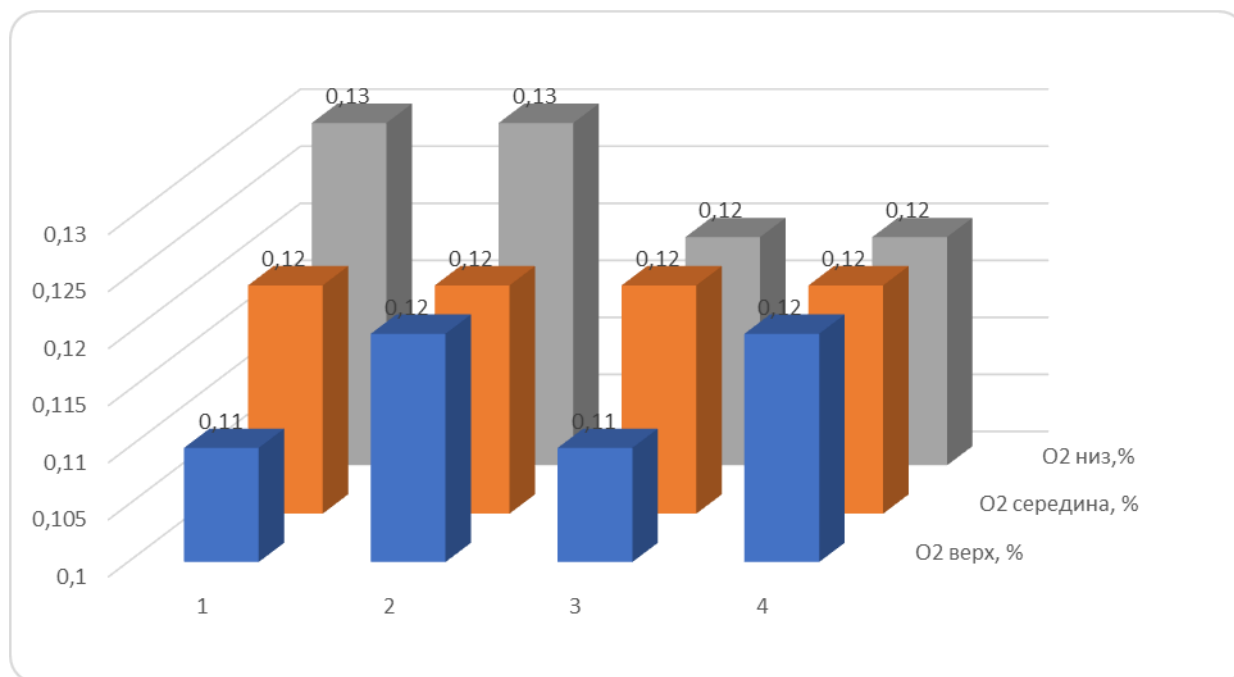


Рисунок 14 – Содержание кислорода (O₂) в 4-х экспериментальных сплавах

Из всех 20 сплавов марки Ti-10V-2Fe-3Al, произведенных методом тройного переплава 4 сплава были разрезаны на несколько частей, также в дальнейшем направлены на термическую обработку согласно схеме обработки в компании «Ауберт Дюваль», учитывая рекомендации конечного потребителя сплава компании «Сафран».

Горячая деформация титанового сплава Ti-10V-2Fe-3Al проводилась по схеме: нагрев 1120 °C, ковка сплава до биллетов диаметром 270 мм, охлаждение на воздухе, нагревание до 810 °C, охлаждение на воздухе, рекристаллизационный отжиг при 905 °C 4-5 часов, ковка до диаметра 260 мм, охлаждение в воде, нагревание до 800 °C, ковка до диаметра 250 мм, охлаждение на воздухе. Поверхность полученных титановых прутков диаметром 250 мм был подвергнут механической обработке по требованиям спецификации компании «Сафран». В дальнейшем с обработанных титановых прутков были срезаны заготовки и шлифы, в которых проведены исследования структуры формованного металла оптической микроскопией, изучены механические свойства испытанием на растяжение и ударной вязкости в компании «Ауберт Дюваль».

Результаты испытаний зависимости твердости по Виккерсу HV [7] от температуры для металла в литом состоянии и после деформации и термообработки приведены на Рисунке 15. Деформированный и термообработанный металл в температурном диапазоне до рекристаллизации (610-640 °C) по сравнению с литым состоянием показывает более высокую твердость. Твердость деформированных и термообработанных образцов сплава составил 3390-3400 МПа в условиях комнатной температуры, что по среднему показателю выше на 450-480 МПа твердости литого сплава.

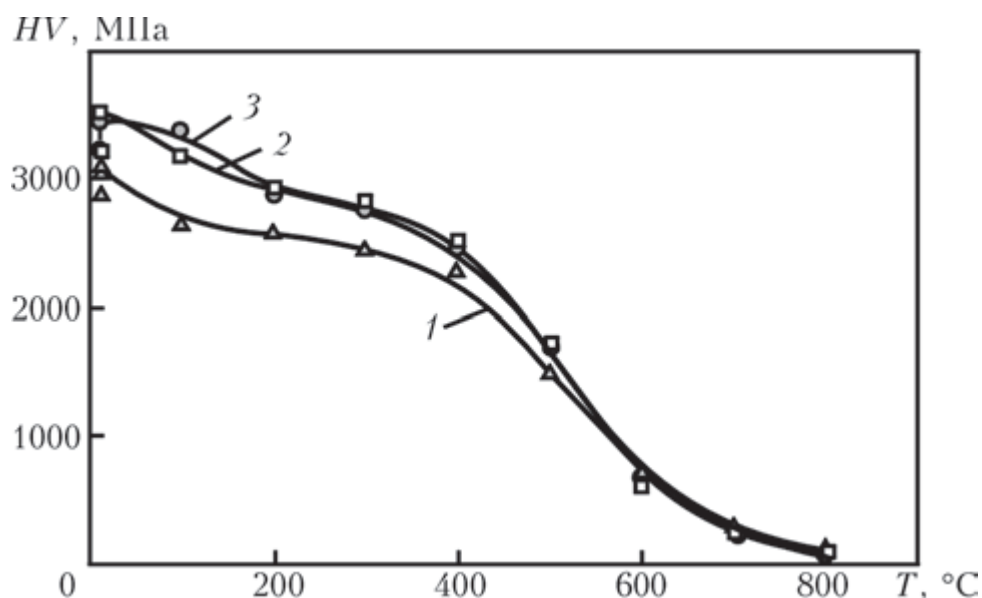


Рисунок 15 – Зависимость твёрдости HV от температуры сплава Ti-10-2-3 в литом состоянии (1) и после термической (2) и механической обработки (3)

Оптической микроскопией исследованные шлифы от литого и кованного сплава Ti-10V-2Fe-3Al показали (Рисунки 16, 17), что металл не имеет макро- и микродефекты и дефектов «бэта-флэк» (Рисунок 18). Дефекты «бэта-флэк» характеризуются темными и светлыми контрастными областями в макроструктуре металла, что объясняется повышенной сегрегацией легирующих элементов в составе сплава. Также замечены не критичные отличия в макроструктуре отдельных частей сплава. В донной части и на боковой поверхности сплава структура зерна вытянута в сторону теплоотвода, в центральной части сплава показывают однородную структуру по размеру.

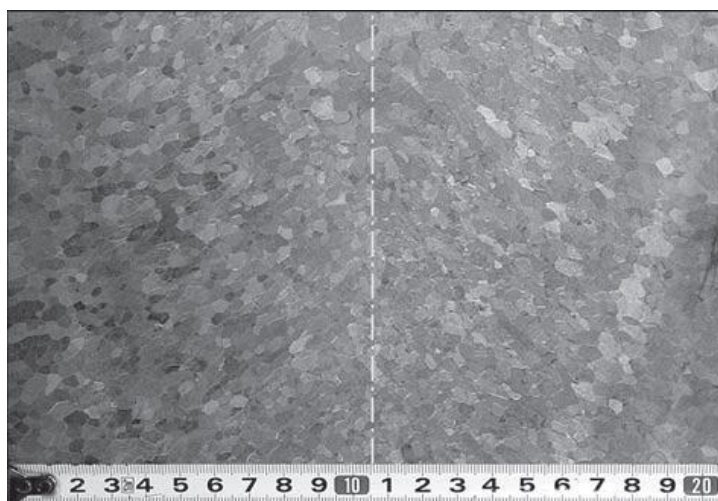


Рисунок 16 – Макроструктура продольного сечения сплава Ti-10V-2Fe-3Al

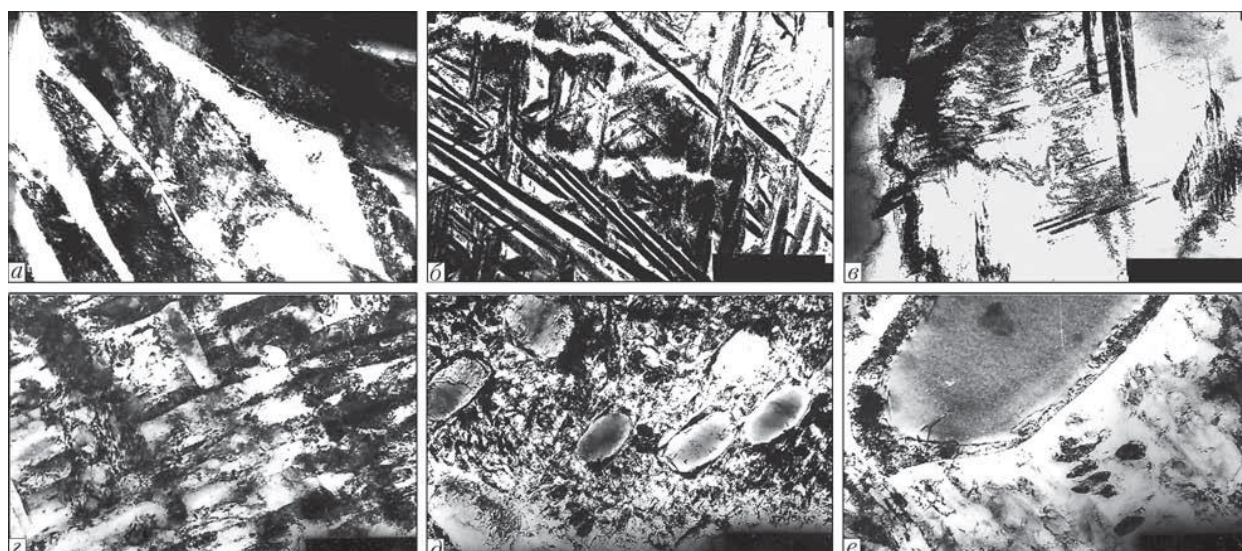
Ti-10V-



Рисунок 17 – Макроструктура сплава Ti-10V-2Fe-3Al
обработки термической деформацией

после

Результаты выполненных механических испытаний сплава Ti-10V-2Fe-3Al (растяжение и ударная вязкость) приведены в Приложении Н.



а – при 29000 кратном увеличении, *б* – при 8000 кратном увеличении, *в* – при 15000 кратном увеличении; после обработки термической и механической деформацией: *г* – при 48000 кратном увеличении, *д* – при 10000 кратном увеличении, *е* – при 36000 кратном увеличении.

Рисунок 18 – Микроструктура сплава Ti-10V-2Fe-3Al
литом состоянии

в

В литом состоянии образцы сплава Ti-10V-2Fe-3Al в ходе механических испытаний показали высокую прочность на уровне 939-1010 МПа и невысокую пластичность $\delta=1,8-12,1$ %. Также по результатам испытаний наблюдается разброс механических свойств.

Исследованные образцы деформированного и термообработанного металла показали высокую прочность (1189-1207 МПа) и сравнительно высокую пластичность ($\delta=11,3-13,7\%$), при этом все разрушались с образованием шейки. Разброс значений предела прочности не превышал 15 МПа (1,2 %), что свидетельствует о хорошей однородности металла.

2.6 Разработка математической модели по показателям технологии тройного переплава Ti-10V-2Fe-3Al произведенного методом вакуумно-дуговой плавки

Цех по производству титановых слитков и сплавов АО «УКТМК» состоит из зоны хранения сырья, подготовки и смешивания, где смеси титановой губки и необходимых компонентов сплава для различных марок титана автоматически готовятся и смешиваются вместе на установке смешивания и шихтоподготовки. Весь материал одной смеси уплотняется гидравлическим прессом для получения специального форменного брикета из титана с заданной геометрией и точно определенным составом. Заданное количество данных брикетов собирают на электрод, используемый для плавки титанового сплава. Для получения стабильного электрода необходимо, чтобы брикеты были сварены вместе в камере плазменной сварки. Данный электрод плавится в вакуумно-дуговой печи переплавки (далее – ВДП) путем подачи электрической энергии для создания электрической дуги между электродом и медным тиглем ВДП. Электрическая дуга расплавляет электрод и образуется первый титановый сплав. Вторая плавка в ВДП необходима для повышения качества и однородности сплава. Готовый сплав проходит очистку щеткой и подвергается непрерывному процессу вращения, для получения сплавов одинаковой формы в качестве конечного продукта.

С момента розжига электрической дуги между расходуемым электродом и поддоном кристаллизатора происходит плавление электрода и образование расплава металла, который из-за низкой температуры соприкосновения с поверхностью водоохлаждаемого кристаллизатора начинает затвердевать.

Таким образом, расходуемый электрод начинает плавиться, образуя постепенно формирующийся титановый сплав в самом кристаллизаторе. В первую очередь, во время плавки начинают плавиться металлы с низкой температурой плавления, такие как, алюминий (Al). Для того, чтобы обеспечить равномерное плавление электрода, состава расплава и шихтовых материалов используются лигатуры, в состав которых добавляется алюминий, что обеспечивает снижение температуры плавления тугоплавких элементов: такие как ванадий и молибден.

Опытным путем была произведена плавка двадцати опытных образцов по методу тройного переплава. Для реализации технологии тройного переплава Ti-10V-2Fe-3Al использовался встроенный алгоритм программы «Level 2 System». В ходе проведения лабораторных исследований процесса тройного переплава были получены параметры скорости плавления сплава, при которых были получены удовлетворительные результаты.

Для исследования и определения математической модели технологии тройного переплава Ti-10V-2Fe-3Al, необходимы знания физико-химических свойств сплава и коэффициентов, входящих в уравнения для получения искомых условий. Для определения неизвестных параметров были проведены сравнения полученных опытным путем показателей и определены допустимые условия исходных параметров для получения удовлетворительного результата.

2.6.1 Математическая модель процесса тройного переплава

Математическая модель технологии тройного переплава Ti-10-2-3 произведенного методом вакуумно-дуговой плавки была определена и изучена на основе данных параметров на каждом этапе переплава, полученных опытным путем.

Тройной переплав двадцати сплавов показал, что необходимое процентное соотношение содержания веществ, согласно требованиям спецификаций, в итоговом сплаве удовлетворяет в семнадцати случаях из двадцати. Данные приведены в Приложении П.

Данные, приведенные в Приложении П были получены из программного комплекса «Level 2 System» в ходе выполнения процесса тройного переплава.

Представим этапы переплава сплавов в виде массива:

$$\begin{bmatrix} Q_1^1 & Q_1^2 & \dots & Q_1^n \\ Q_2^1 & Q_2^2 & \dots & Q_2^n \\ Q_3^1 & Q_3^2 & \dots & Q_3^n \end{bmatrix}$$

где Q – опытный образец переплавленного сплава,

n – номер опытного образца сплава,

1,2,3 – этапы переплава.

Скорость плавления электрода (V_n) можно найти, используя коэффициент расплавления электрода (α_n).

$$\alpha_n = \frac{\Delta m}{I_d \cdot \Delta t} \quad (2.1)$$

где Δm – масса расплавленного сплава, г;

Δt – время, затраченное на расплавление сплава Δm , час;

I_d – ток дуги, кА.

Выразив массу расплавленного сплава через длину расплавленного участка электрода и удельный вес титана $V_n = \Delta l / \Delta t$, получим:

$$\alpha_n = \frac{S_z \cdot V_n \cdot \gamma_T}{I_d} \quad (2.2)$$

где S_3 – площадь электрода, мм²;

$V_{\text{п}}$ – скорость подачи электрода, мм/с;

$\gamma_{\text{т}}$ – удельный вес титана, г/см³

$I_{\text{д}}$ – ток дуги, кА.

В соответствии с законом сохранения вещества и энергии определяется скорость плавления электрода:

$$V_{\text{п}} = \frac{I_{\text{д}} \cdot \alpha_{\text{п}}}{S_3 \cdot \gamma_{\text{т}}} \quad (2.3)$$

Скорость подачи электрода является равной скорости плавления:

$$V_3 = V_{\text{п}}.$$

Определенная экспериментальным путем скорость плавления ΔV дает возможность математическим путем определить значение искомым параметров для каждого перепада $\{Q_1^1, Q_2^1, Q_3^1, \dots Q_3^n\}$.

Для каждого перепада Q определяем площадь электрода:

$$S_3 = \frac{\pi D_3^2}{4} \quad (2.4)$$

При применении значений параметров, полученных в ходе экспериментальной плавки, были получены исходные значения для дальнейшего применения модели плавления (Приложение П).

На рисунке 19 показан график зависимости параметров процентного содержания вещества Al при увеличении скорости плавления. При достижении необходимой скорости, сплав обретает свойства, удовлетворяющие требованиям спецификаций (шкала Y). На графике рис. 2.15 видно, что на разных этапах плавки процентное содержание алюминия достигает необходимой концентрации при полученной практически путем необходимой скорости плавления. По требованиям спецификации нижняя граница содержания Al составляет 2,95%, а верхняя граница – 3,35 %. Из графика видно, что при первой плавке Q1, стабильность предельных условий достигается при скорости плавления 10 кг/мин, при второй плавке Q2, стабильность предельных условий достигается при скорости плавления 8 кг/мин, при третьей плавке Q3, стабильность предельных условий достигается при скорости плавления 3,5 кг/мин.

Из Приложения П видно, что при первой плавке Q1, удовлетворительная скорость плавления ≈ 10 кг/мин, при второй плавке Q2, удовлетворительная скорость плавления ≈ 8 кг/мин, при третьей плавке Q3, удовлетворительная скорость плавления $\approx 3,5$ кг/мин.

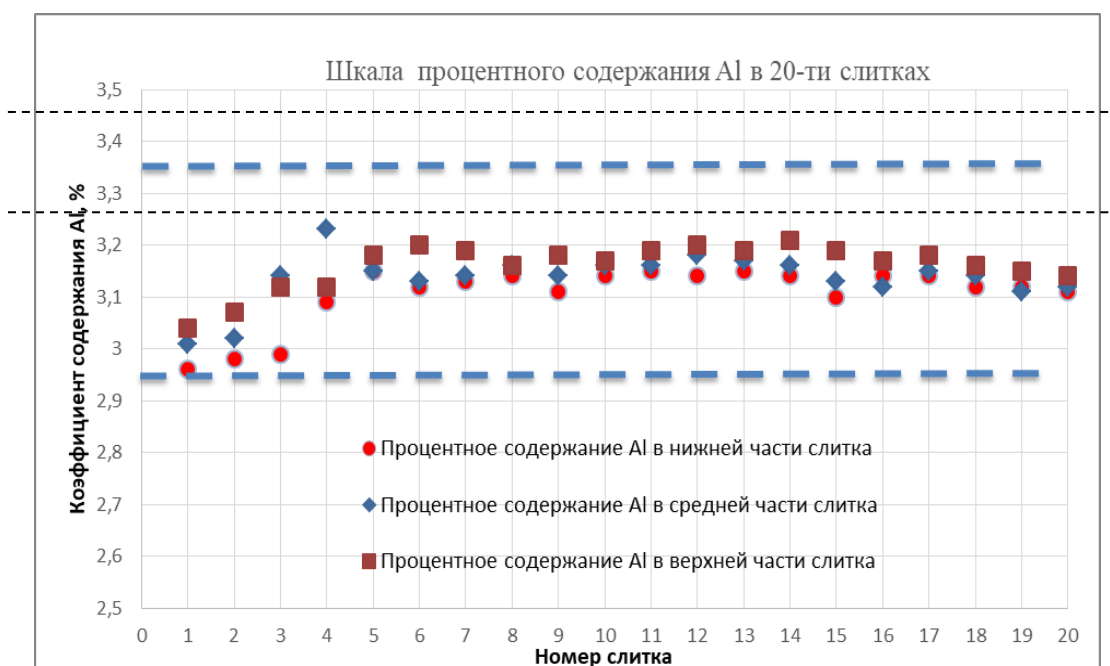


Рисунок 19 – Шкала процентного содержания необходимой концентрации вещества Al каждого из двадцати слитков на каждом этапе плавки

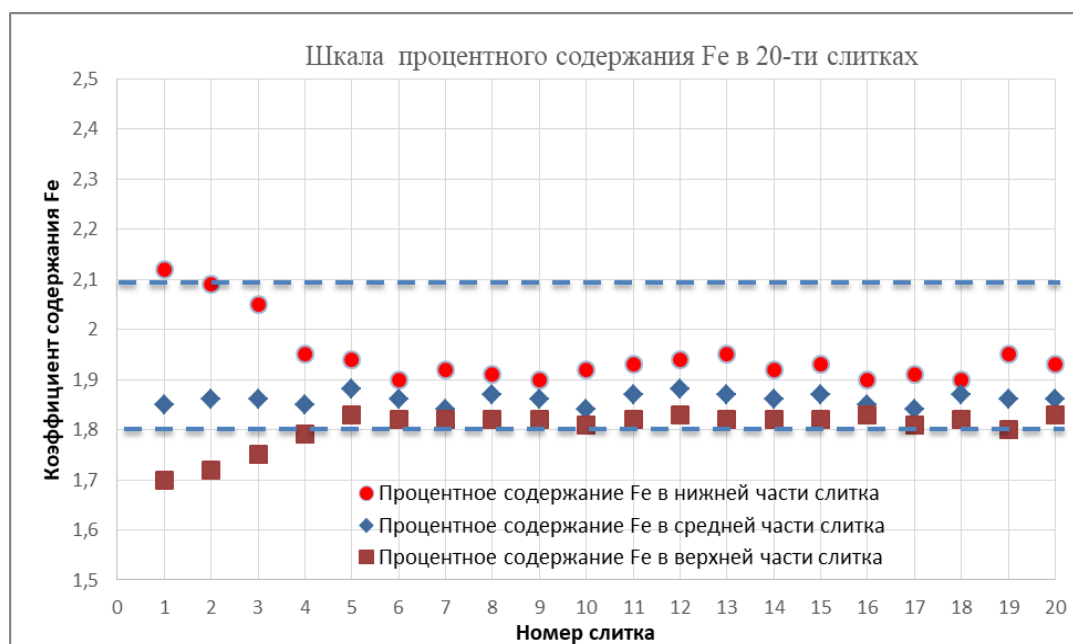


Рисунок 20 – Шкала процентного содержания необходимой концентрации вещества Fe каждого из двадцати слитков на каждом этапе плавки

На рисунке 20 показана зависимость параметров процентного содержания вещества Fe при увеличении скорости плавления. При достижении необходимой скорости, сплав обретает свойства, удовлетворяющие требованиям спецификаций (шкала Y). На графике рис. 2.16 видно, что на разных этапах плавки процентное содержание алюминия достигает необходимой концентрации при полученной практически путем необходимой скорости плавления. По требованиям спецификации нижняя граница содержания Fe составляет 1,80 %, а верхняя граница

– 2,10 %. Из графика видно, что при первой плавке Q1, стабильность предельных условий достигается при скорости плавления 10 кг/мин, при второй плавке Q2, стабильность предельных условий достигается при скорости плавления 8 кг/мин, при третьей плавке Q3, стабильность предельных условий достигается при скорости плавления 3,5 кг/мин.

На Рисунках 21, 22 видны тренды, снятые из системы Level 2 System, на которых видно, что полученные значения свойств и параметров граничных условий удовлетворительно описывают динамику изменения профиля ванны в течение режима переплава.

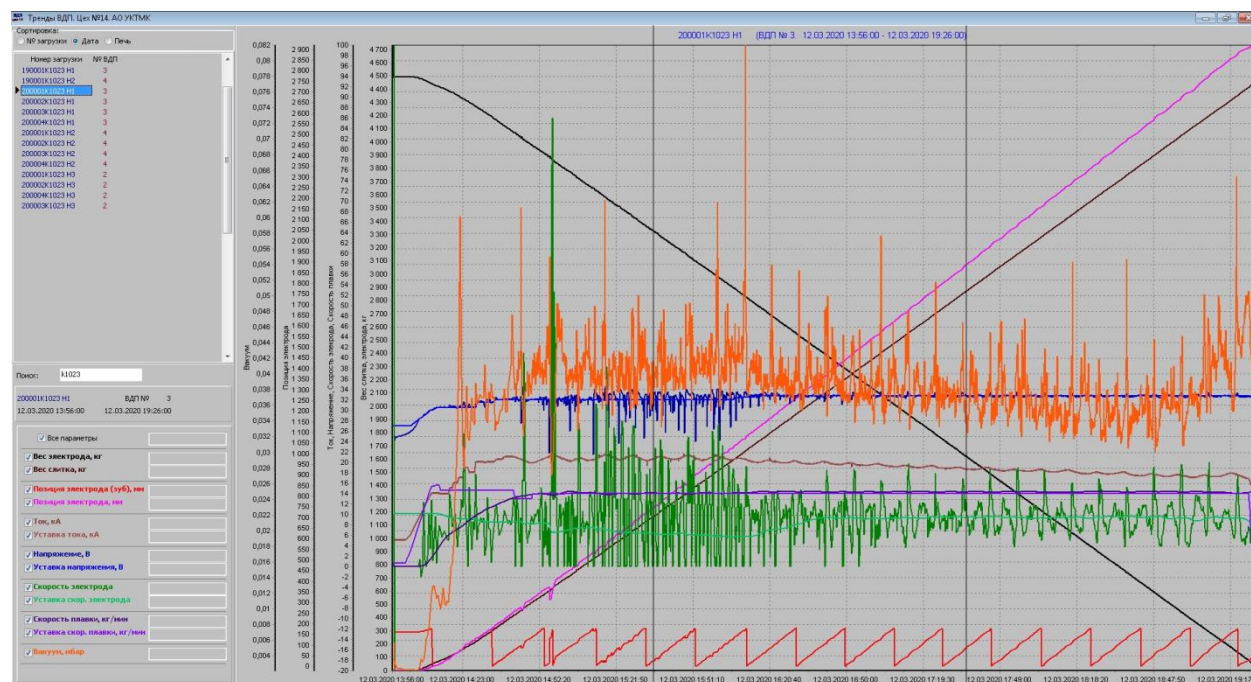


Рисунок 21 – Снимок трендов слитка 1023/1 ВДП

По результатам исследования, полученным в ходе лабораторных исследований и в ходе вычисления математической модели, была установлена скорость, необходимая для каждого этапа переплава и определены ключевые физические параметры начальных условий процесса тройного переплава: скорость плавки электрода, напряжение и сила тока дуги.

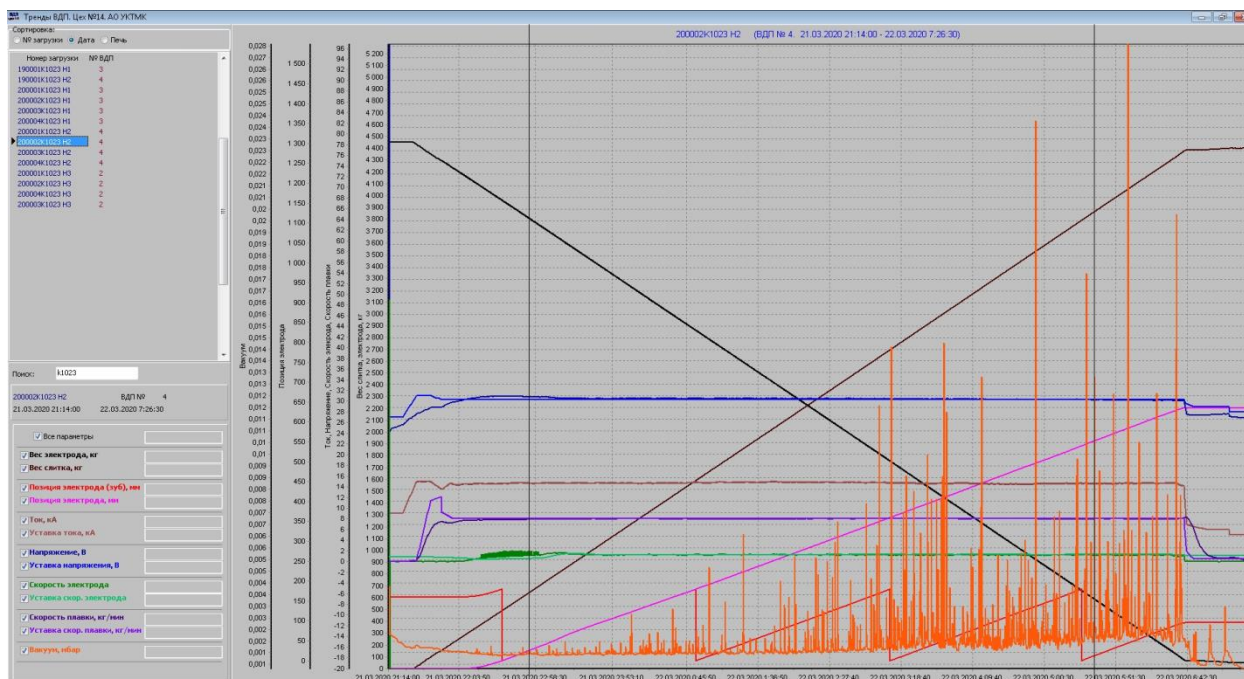


Рисунок 22 – Снимок трендов слитка 1023/2ВДП. Цех №14, АО «УКТМК»

2.7 Рекомендации по автоматизации процесса технологии тройного переплава Ti-10V-2Fe-3Al произведенного методом вакуумно-дуговой плавки

Для программной реализации технологии тройного переплава Ti-10V-2Fe-3Al произведенного методом вакуумно-дуговой плавки используется алгоритм программы «Level 2 System».

В данной работе физико-химического исследования титанового сплава тройного переплава Ti-10V-2Fe-3Al найдены значения параметров, позволяющие удовлетворительно описать изменение профиля при плавлении сплава во время ВДП для различных условий процесса (скорость плавки электрода, напряжение и сила тока дуги).

Система управления технологическим процессом «Level 2 System» будет настроена следующими модулями:

- планирование производства;
- графики переработки;
- руководство процессом;
- планирование запасов;
- сбор и хранение данных о процессах и продуктах;
- сбор и хранение данных оборудования.

На Рисунке 22 представлена схема автоматизации и применения на производстве системы Level 2 System в цехе № 14 АО «УКТМК».

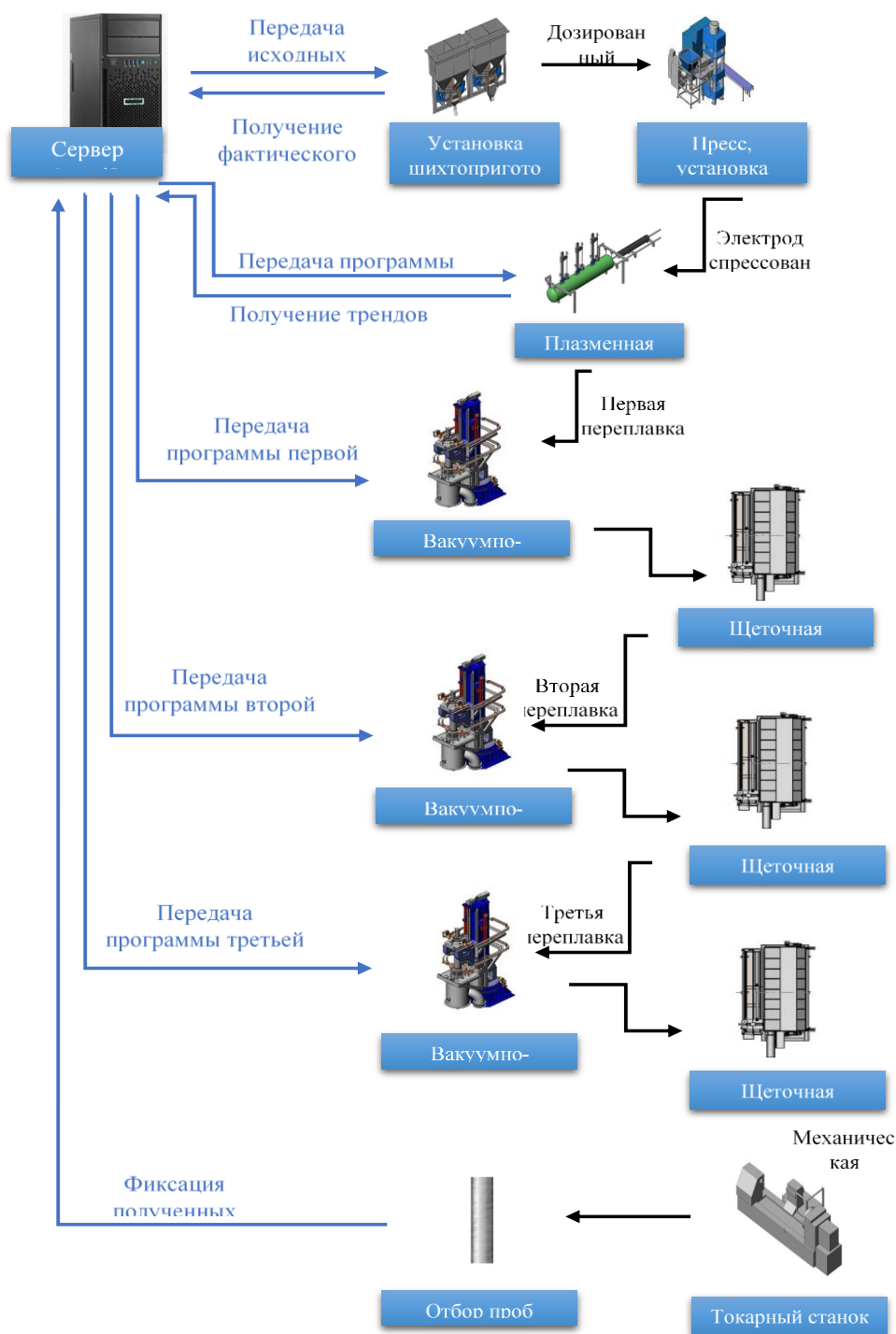


Рисунок 22 – Схема автоматизации системы Level 2 System

Опытное использование «Level 2 System» в условиях цеха № 14 показало возможность дальнейшего применения данного алгоритма, с использованием автоматизированного средства «Level 2 System».

В условиях постоянно развивающихся новых технологий, процессов автоматизации на промышленных предприятиях, необходимы новейшие решения, которые позволяют:

- увеличить объемы выпускаемой продукции;

– осуществить сложные технологические задачи за короткое время.

На Рисунке 23 показан снимок системы Level 2 System с данными по слитку, полученному в результате тройной переплавки.

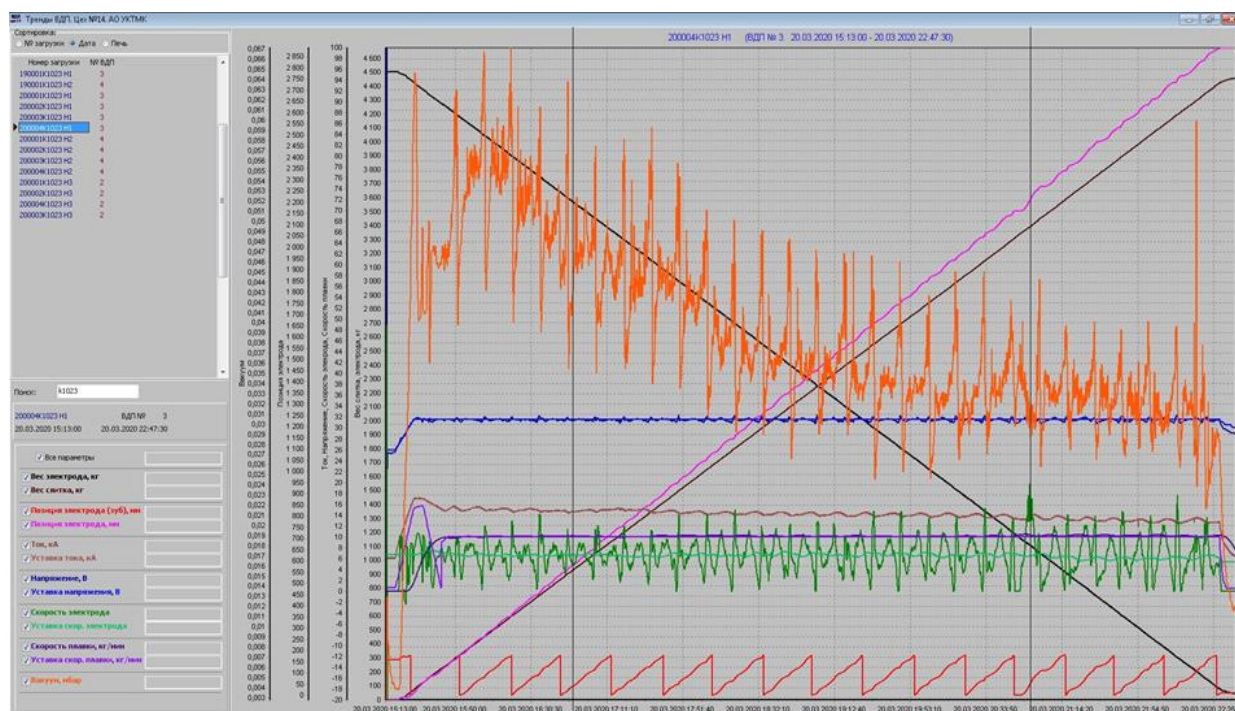


Рисунок 23 – Снимок тренда слитка 1023/4 ВДП

Данные, полученные в результате экспериментальной плавки и данные, полученные в результате вычисления математической модели, позволят автоматизировать процесс тройного переплава, установив для системы Level 2 System вычисленные начальные параметры скорости плавки, напряжения и тока дуги и на выходе получать сплав, соответствующий требованиям спецификаций, минуса потери.

Цель использования системы Level 2 System – это необходимость ежедневной оптимизации продукта и производства. Система Level 2 должна быть полностью интегрированная в повседневный производственный процесс и поддерживающая операционный персонал в выполнении его обязанностей. Цель состоит в том, чтобы оптимизировать затраты и процедуры, избежать ошибок или, по крайней мере, сделать их четко видимыми и при этом предоставить оператору достаточную свободу для принятия ответственных решений на основе собственного опыта. Для этого будет реализована целостная концепция заданных параметров процесса, сбора данных о продукции и производстве, а также простой способ оценки результатов. Данные о процессах, связанных с качеством, будут храниться не менее 40 лет.

3. Расчет экономической эффективности производства титанового сплава тройного переплава на АО «УКТМК»

3.1 Параметры проекта

- Дата начала проекта – 2019 год
- Основная валюта расчета проекта – Казахстанский тенге
- Все расчеты производятся в постоянных ценах
- Метод расчета эффективности проекта – метод «прироста» доходов/затрат проекта
- Ставка дисконтирования – 11,67 %.

Месторасположение – Восточно-Казахстанская область, город Усть-Каменогорск, АО «УКТМК», цех №14 по производству титановых слитков и сплавов.

3.2 Концепция проекта

Концепция проекта заключается в расширении рынка сбыта и увеличении производства продукции за счет внедрения в производство новых марок титановых сплавов Grade 10-2-3.

3.3 Преимущества проекта

- Увеличение номенклатуры выпускаемой титановой продукции с высокой добавленной стоимостью;
- Рост прибыли компании;
- Увеличение налоговых отчислений в бюджет Республики Казахстан.

3.4 Инвестиционный план

Финансирование проекта планируется осуществить за счет собственных средств АО «УКТМК».

Для реализации инвестиционного проекта необходимо приобретение и модификация оборудования, в том числе:

- 3 ед. кристаллизатора на печи ВДП фирмы «G&M Procurement» (ФРГ);
- оснастка, монтаж и пуско-наладка пресса 500 мм, фирма «Siempelkamp» (ФРГ).

В Таблице 2 представлены фиксированные инвестиционные расходы

Таблица 2 – Фиксированные инвестиционные расходы

Наименование	Ед. изм.	Всего	в том числе по годам	
			2019 г.	2020 г.
Приобретение оборудования, в т.ч.				
3 ед. кристаллизатора на печи ВДП	млн. тенге	170	170	
Сменный инструмент пресса «Siempelkamp» Д500 мм	млн. тенге	177		177
Итого по капитальным вложениям	млн. тенге	347	170	177

В результате, период инвестиционной фазы разбит на 2 года, начиная с 2019 года по 2020 год. При этом общий планируемый объем инвестиций составляет 347 млн. тенге.

3.5 Трудовые ресурсы

В настоящее время технический персонал цеха №14 составляет 68 человек. В рамках реализации инвестиционного проекта привлечение дополнительных трудовых ресурсов не потребуется.

3.6 Оценка эффективности реализации проекта

Расчет экономической эффективности инвестиционного проекта представлен как сравнение ситуаций «без проекта» – без производства титановых сплавов 10-2-3 и «с проектом» – соответственно с учетом производства титановых сплавов 10-2-3.

Экономический эффект реализации инвестиционного проекта заключается в дополнительном производстве и реализации новых титановых сплавов 10-2-3 с высокой добавленной стоимостью.

Условия расчета:

- объемы производства и реализации титановых сплавов 10-2-3 в инвестиционный период приняты от 6 до 17 тн, в первый эксплуатационный период планируется увеличить объемы до 50 тн, с последующим ростом на 25-50 тн. ежегодно;

- цена реализации титановых сплавов 10-2-3 принята на сегодняшний день по котировкам из официальных источников ;

- себестоимость титановых сплавов 10-2-3 рассчитана с учетом вовлечения дополнительного сырья (лигатура Al-V-Fe) и расходов на электроэнергию и накладных расходов на один дополнительный процесс плавки.

- норма амортизации принята в размере 10 % исходя из срока службы оборудования.

- сумма корпоративного подоходного налога рассчитана как 20 % от налогооблагаемого дохода, согласно налоговому кодексу Республики Казахстан.

Сравнительный анализ себестоимости и рентабельности производства титановых сплавов 10-2-3 со сплавами марки Grade 5 представлен в таблице 3

Таблица 3 – Сравнительный анализ себестоимости и рентабельности производства титановых сплавов 10-2-3 со сплавами марки Grade 5

Наименование статей	Ед. изм.	На единицу		Отклонение	
		Сплав Grade 5	Сплав 10-2-3	абс.	отн., %
Сырье и основные материалы	млн. тенге/тн.	3,75	5,16	1,41	38%
Возвратные отходы	млн. тенге/тн.	-0,01	-0,01	0,00	0 %
Вспомогательные материалы	млн. тенге/тн.	0,21	0,11	-0,10	-47%
Энергетические затраты	млн. тенге/тн.	0,01	0,01	0,00	0 %
Заработная плата, социальные отчисления	млн. тенге/тн.	0,07	0,01	-0,06	-90%
Накладные расходы	млн. тенге/тн.	0,30	0,11	-0,18	-62%
Цеховая себестоимость товарной продукции	млн. тенге/тн.	4,33	5,39	1,06	25%
Расходы периода	млн. тенге/тн.	0,73	0,51	-0,22	-30%
Полная себестоимость реализованной продукции	млн. тенге/тн.	5,06	5,90	0,84	17%
Цена реализации товарной продукции	млн. тенге/тн.	6,51	8,04	1,53	24%
Операционная прибыль	млн. тенге/тн.	1,45	2,14	0,69	48%
Рентабельность продаж	%	22%	27%	5%	-

В результате, себестоимость 1 тн. титанового сплава 10-2-3 составляет 5,9 млн. тенге/тн., что на 17 % или на 0,84 млн. тенге/тн., больше себестоимости сплавов марки Grade 5. Вместе с тем, цена реализации сплавов 10-2-3 составляет 8,04 млн. тенге/тн., что на 24 % или на 1,53 млн. тенге/тн., больше цены реализации сплавов марки Grade 5. В результате рентабельность сплавов 10-2-3 составляет 27 %, что на 5 % больше рентабельности сплавов марки Grade 5.

При расчете показателей оценки целесообразности проекта использовались следующие индикаторы: чистый приведенный доход (NPV), срок окупаемости (PB), дисконтированный период окупаемости (DPB), индекс прибыльности (PI), внутренняя норма доходности (IRR). Сводные показатели эффективности инвестиций представлены в Таблице 4.

Расчет показателей оценки целесообразности реализации проекта, представлен в Приложении Р.

Таблица 4 – Сводные показатели эффективности инвестиций

Показатель	Итоговое значение
Ставка дисконтирования, %	11,67
Период окупаемости – РВ, год	3,5
Дисконтированный срок окупаемости – DPB, год	3,9
Чистый приведенный доход – NPV, млн. тенге	597
Индекс прибыльности – PI	4
Внутренняя норма доходности – IRR, %	59

Анализ показателей эффективности инвестиций позволяет сделать вывод, что при прогнозируемых капитальных вложениях и производственных издержках, производство титанового сплава 10-2-3 генерирует положительные денежные потоки.

В результате сравнения ситуаций видно, что экономический эффект в виде прироста чистой прибыли от производства и реализации титановых сплавов 10-2-3 в рассматриваемый период с 2019-2025 годы составит 1 379 млн. тенге, при этом прирост дополнительных налоговых отчислений в бюджет по КПН составит 345 млн. тенге.

В результате произведенных расчетов можно сделать вывод, что показатель чистого приведенного дохода, внутренней нормы рентабельности и периода окупаемости, соответствуют обязательным условиям реализации инвестиционного проекта. В нашем случае NPV равно 597 млн. тенге (условие NPV больше 0), IRR равно 59 %, что не ниже требуемой нормы рентабельности 11,67 %, PI равно 4, что выше обязательного условия проекта PI больше 1.

Период окупаемости проекта без учета дисконтирования составит 3,5 года, а с учетом дисконтирования составит 3,9 года, что вполне является приемлемым, так как входит, в период расчета интегральных показателей, который равен 7 годам.

Таким образом, производство новых марок титановых сплавов 10-2-3 является наиболее рентабельным по сравнению с существующими марками титановых сплавов на АО «УКТМК», что позволит окупить инвестиционные вложения в кратчайшие сроки. В целом реализация данного проекта позволит АО «УКТМК», увеличить прибыльность и рентабельность компании, повысить уровень конкурентоспособности казахстанского титана на международном рынке.

Вопросы безопасности жизнедеятельности и охраны труда в Приложении С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе произведен критический анализ литературы по физико-химическим и механическим свойствам и исследованиям титановых сплавов Ti-10V-2Fe-3Al, получаемых методом тройного вакуумно-дугового переплава. Систематизированы данные по физико-химическим и механическим свойствам титановых сплавов, а также проведен детальный анализ мирового производства титановых сплавов по странам производителям и методам плавки.

Экспериментальные данные, полученные в ходе химического анализа сплава 1023/4, произведенного по заданным значениям элементов: Al – 3,25 %, V – 9,7 %, Fe – 1,95 %, O – 0,105 %, и скоростью на первом переплаве 10 кг/мин, втором – 8 кг/мин и низкой скоростью на третьем переплаве – 3,5 кг/мин определяют прямую зависимость сегрегации химических элементов Fe, O, Al от выбранного режима напряжения электрической дуги и скорости плавления третьего переплава.

Таким образом, экспериментальными данными подтверждено, что наиболее важным фактором для достижения химического состава сплава, соответствующего спецификации, является низкая скорость на окончательном третьем переплаве титанового сплава марки Ti-10V-2Fe-3Al.

В экспериментальной части диссертации проведена работа по определению оптимальных технологических параметров процесса плавки титановых сплавов Ti-10V-2Fe-3Al методом тройного вакуумно-дугового переплава на технологическом оборудовании АО «УК ТМК». Получены экспериментальные данные зависимости химического состава титановых сплавов от основных технологических параметров. На основании полученных данных составлена математическая модель, по которой определен интервал допустимых технологических параметров процесса плавки, при соблюдении которых титановый сплав Ti-10V-2Fe-3Al полностью соответствует требованиям спецификации. Также, определены основные физические и механические свойства полученных титановых сплавов.

В экономической части работы произведено сравнение экономической эффективности производства титановых сплавов методом двойного и тройного вакуумно-дугового переплава, себестоимости и рентабельности, определен срок окупаемости внедрения проекта по производству титановых сплавов Ti-10V-2Fe-3Al на АО «УК ТМК».

В диссертационной работе отражены вопросы безопасности жизнедеятельности и охраны труда при производстве титановых сплавов. Определены вредные и опасные факторы производства, их возможное влияние на рабочий персонал, средства и меры защиты, а также вопросы экологии и воздействия на окружающую среду.

По результатам диссертационной работы сделаны следующие выводы:

- 1) Титановый сплав Ti-10V-2Fe-3Al по физико-химическим и механическим свойствам наиболее применим для производства высоконагруженных изделий для аэрокосмической отрасли промышленности;

2) Наиболее распространённым методом производства титановых сплавов в мире является метод вакуумно-дугового переплава;

3) На предприятиях стран СНГ нет опыта промышленного производства титановых сплавов Ti-10V-2Fe-3Al.

4) Проведены опытные плавки 20 титановых сплавов Ti-10V-2Fe-3Al, 17 из которых полностью соответствуют спецификациям компаний «Сафран» и «Ауберт Дюваль».

5) Определена зависимость между основными технологическими параметрами процесса плавки и химическим составом получаемых титановых сплавов.

6) Определены оптимальные технологические параметры процесса плавки титановых сплавов Ti-10V-2Fe-3Al.

7) Определены физические и механические свойства полученных титановых сплавов Ti-10V-2Fe-3Al.

8) Экономический эффект в виде прироста чистой прибыли от производства и реализации титановых сплавов 10-2-3 в рассматриваемый период с 2019-2025 годы составит 1 379 млн. тенге, при этом прирост дополнительных налоговых отчислений в бюджет по КПН составит 345 млн. тенге. Срок окупаемости инвестиционных вложений составит 3,9 года.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Кершенбаум В.С. Международная инженерная энциклопедия: Международный транслятор современных статей и сплавов / под ред. В.С. Кершенбаума. – М.: Наука и техника. 1992. – 650 с.
- 2 Ильин А.А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник / А.А. Ильин, Б.А. Колачев, И.С. Полькин. – М.: ВИЛС–МАТИ. – 520 с.
- 3 Boyer R. Materials Properties Handbook. Titanium Alloys. / Ed. by R. Boyer, G. Welsch, E.W. Collings. – OH, USA, ASM International: Materials Park, 1994. – 1176 p.
- 4 Кондрашов Е.Н. Исследование структуры кристаллизации сплава Ti-10V-2Fe-3Al при ВДП / Е.Н. Кондрашов, М.О. Ледер, К.А. Русаков // Титан. – 2017. – № 1 (55). – С. 22-27.
- 5 Колобов Г. А. Традиционные и новые технологии рафинирования титана / Г. А. Колобов, К. А. Печерица // Титан-2010 в СНГ: сб. трудов междунар. конф., г. Екатеринбург. - К.: ИМФ НАНУ, 2010. - С. 68-72 // Титан, 2010. - № 1 (27). - С. 18-23.
- 6 Microstructural evolution in the surface of Ti-10V-2Fe-3Al alloy by solution treatments / Lichun Qi, Kaichao Zhang, Xueliang Qiao, Lijun Huang, Xu Huang, Xinqing Zhao - Progress in Natural Science: Materials International, Volume 30, Issue 1, February 2020, Pages 106-109
- 7 Колобов Г. А. Титан вторичный, часть 1 / Г. А. Колобов, В. И. Пожуев, В. В. Тэлин. - Запорожье: ЗГИА, 2006. - 124 с.
- 8 Effect of cold rolling deformation on the microstructure and properties of Ti-10V-2Fe-3Al alloy / Lichun Qi, Xueliang Qiao, Lijun Huang, Xu Huang, Wenlong Xiao, Xinqing Zhao – Materials Characterization, Volume 155, September 2019, 109789
- 9 Электронно-лучевая плавка титана / [Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук]. - К.: Наукова думка, 2006. - 248 с.
- 10 Ахонин С. В. К вопросу о механизме удаления водорода из титана в процессе электронно-лучевой плавки /
- 11 В.Н. Еременко Титан и его сплавы. Издание второе исправленное и дополненное. Издательство академии наук Украинской ССР, Киев 1960
- 12 Ахонин С. В. Математическое моделирование процесса растворения кислородсодержащих тугоплавких включений в расплаве титана
- 13 Effect of structural stability on the stress induced martensitic transformation in Ti-10V-2Fe-3Al alloy / Lichun Qi, Xueliang Qiao, Lijun Huang, Xu Huang, Xinqing Zhao – Materials Science and Engineering: A, Volume 756, May 2019, Pages 381-388
- 14 Microstructure design and in-situ investigation of TRIP/TWIP effects in a forged dual-phase Ti-10V-2Fe-3Al alloy / Y. Danard, R. Poulain, M. Garcia, R. Guillou, D. Thiaudière, S. Mantrid, R. Banerjee, F. Suna, F. Prima – Materialia, Volume 8, December 2019, 100507
- 15 Рафинирование титана в электронно-лучевых печах с промежуточной емкостью / [Н. П. Тригуб, А. Я. Дереча, А. Н. Калинюк и др.] // Проблемы СЭМ, 1998. - № 2. - С. 16-20.

16 Сергиенко С. Н. Электронно-лучевой переплав титана / С. Н. Сергиенко, А. Н. Веселовский // Электрометаллургия, 2001. - № 11. - С. 33-34.

17 Влияние содержания углерода на структуру и механические свойства сплава Ti-10V-2Fe-3Al / А. В. Желнина, А. Г. Илларионов, М. С. Калиенко, А. А. Попов, Н. В. Щетников – XIX международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлословов-молосых ученых. — Екатеринбург, 2018

18 Ахонин С. В. Математическое моделирование процесса растворения включений TiN в расплаве титана при ЭЛП / С. В. Ахонин // Проблемы СЭМ, 2001. - № 1. - С. 2024.

19 Sintering of Ti-10V-2Fe-3Al and mechanical properties / Y.F. Yang, S.D. Luo, G.B. Schaffer, M. Qian – Materials Science and Engineering: A, Volume 528, Issues 22–23, August 2011, Pages 6719-6726

20 Study on the deformation behavior of β phase in Ti-10V-2Fe-3Al alloy by micro-indentation / Xinkai Ma, Fuguo Li, Jun Cao, Zhankun Sun, Qiong Wan, Jinghui Li, Zhanwei Yuan – Journal of Alloys and Compounds, Volume 703, May 2017, Pages 298-308

21 Печь с прямым горном для рафинирования титана: пат. 5972282 США, МПК6 С 21 С 7/10. / С.Е. Aguirre, S.H. Reichman, L.C.Hainz. - № 09/085635; заявл. 27.05.1998; опубли. 26.10.1999.

22 Deformation behaviour and mechanisms during hot compression at supertransus temperatures in Ti-10V-2Fe-3Al / Juan Zhao, Jie Zhong, Fei Yan, Fang Chai, Matthew Dargusch – Journal of Alloys and Compounds, Volume 710, July 2017, Pages 616-627

23 Получение титана высокой чистоты / [А. В. Елютин, Л. И. Вороненко, Ф. В. Ковалев и др.] / 10-я конф. по химии высокочист. Веществ: тез. докл. - Н. Новгород, 1995. - С. 116-117.

24 Получение высокочистого титана: заявка 62-280335 Япония, МКИ С 22 В 34/12, С 22 В 14.00 / Симотори Кадзуми, Коэти Иосихару; заявл. 30.05.1986 ; опубли. 05.12.1987.

25 Способ получения титана высокой чистоты: пат. 4891066 США, МКИ4 С 22 В 34/12 / Казуми Шиматори, Йоши-хари Очи; заявл. 15.07.1988; опубли. 02.01.1990.

26 Изучение кинетики растворения включений нитрида титана в расплаве титановых сплавов / [Г. М. Григоренко, В. Ю. Орловский, С. В. Ахонин, Ю. М. Помарин] // Титан, 2009. - №2(24). - С. 24-29.

27 Microstructure and mechanical properties of laser welded Ti-10V-2Fe-3Al (Ti1023) titanium alloy / Ahmad Chamanfar, Meng-Fu Huang, Timotius Pasang, Masahiro Tsukamoto, Wojciech Z. Misiolek – Journal of Materials Research and Technology, Volume 9, Issue 4, July–August 2020, Pages 7721-7731

28 Modrzynski А. Плазменная переплавка титановых сплавов / А. Modrzynski и др. // Arch. technol. mазs. i autom., 2002. - 22. - № 1. - С. 102-107.

29 Modrzynski А. Recycling of titanium alloys in plasma furnace / А. Modrzynski, K. Grzeskowiak, M. Kornacki / Mechanika (Lietuva), 2005. - № 6. - Р. 67-70.

30 Eschenbach R.C. Plasma Arc systems for waste treatment and metal recovery / R.C. Eschenbach / JOM: J. Miner, Metals and Mater. Soc, 1996. - 48. - № 6. - Р. 49-52.

31 К вопросу о возможности переплава губчатого титана с повышенным содержанием техногенных примесей / [М. Л. Жадкевич, Ю. В. Латаш, В. С. Константинов и др.] // Проблемы СЭМ, 1998. - № 3. - С. 43-45.

32 Reitz J. Recycling of gamma titanium aluminide scrap from investment casting operations / J. Reitz, C. Lochbichler, B. Friedrich // Intermetallics, 2011. - 19. - № 6. - P. 762-768.

33 И.А. Логачев, В.И. Разумовский, И.М. Разумовский, К.Л. Косырев, А.И. Логачёва/ Разработка теоретической процедуры оценки сбалансированности химического состава жаропрочного титанового сплава нового поколения и создание на этой основе методики оптимизации составов титановых сплавов // Журнал Титан №4 2012 стр. 27-31.

34 Государственная программа индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2020 – 2025 годы. Утверждена постановлением Правительства Республики Казахстан от 31.12.2019 года, №1050.

35 Cutting fluid application for titanium alloys Ti-6Al-4V and Ti-10V-2Fe-3Al in a finish turning process / Chris M Taylor, Samantha Giovana Abrego Hernandez, Matthew Marshall, Matt Broderick – Procedia CIRP, Volume 77, 2018, Pages 441-444.

36 Stress-induced martensitic transformation in a β -solution treated Ti-10V-2Fe-3Al alloy during compressive deformation / Xinkai Ma, Zhuo Chen, Lei Xiao, Shifeng Luo, Wenjie Lu – Materials Science and Engineering, Volume 801 2020.

37 Simulation analysis and experimental study of milling surface residual stress of Ti-10V-2Fe-3Al / Qiong Wu, Dong-Jian Xie, Yu Si, Yi-Du Zhang, Lei Li, Ying-Xin Zhao – State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing, 100191, PR China.

38 Возможности камерного электрошлакового переплава в получении титана коммерческой чистоты / [А. Д. Рябцев, А. А. Троянский, С. И. Давыдов и др.] // Современная электрометаллургия, 2012. - № 1. - С. 7-11.

39 Enhanced protective coatings on Ti-10V-2Fe-3Al alloy through anodizing and post-sealing with layered double hydroxides Lei Liu, Liang Wu, Xiaobo Chen, Deen Sun, Yuan Chen, Gen Zhang, Xingxing Ding, Fusheng Pan - Materials Science and Technology, 2019.

40 Рябцев А. Д. Рафинирование и легирование титана в процессе камерного электрошлакового переплава / А. Д. Рябцев, А. А. Троянский // Современная электрометаллургия, 2011. - № 1. - С. 52-53.

41 Рафинирование и легирование титана при камерном электрошлаковом переплаве / [А. Д. Рябцев, А. А. Троянский, Ф. Л. Леоха, С. Н. Ратиев] / Современные проблемы электрометаллургии стали: матер. 15 междунар. конф., Ч.2. - Челябинск, 2013. - С. 96-101.

42 Plastic deformation behavior and microscopic mechanism of metastable Ti10V-2Fe-3Al alloy single crystal pillars orientated to $\langle 011 \rangle \beta$ in submicron scales Part I: Double size effects and martensitic transformation prediction / Yan Pan, Qiaoyan Sun, Lin Xiao, Xiangdong Ding, Jun Sun – State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China.

43 The spatial distribution of α phase in laser melting deposition additive manufactured Ti-10V-2Fe-3Al alloy / Zongge Jiao, Jun Fu, Zhuo Li, Xu Cheng, Haibo Tang, Huaming Wang – National Engineering Laboratory of Additive Manufacturing for Large Metallic Components and Engineering Research Center of Ministry of Education on Laser Direct Manufacturing for Large Metallic Components, School of Materials Science and Engineering, Beihang University, 37 Xueyuan Road, Beijing, China.

44 Strain rate effects on tensile deformation behaviors of Ti-10V-2Fe-3Al alloy undergoing stress-induced martensitic transformation / Xinkai Ma, Fuguo Li, Jun Cao, Jinghui Li, Zhankun Sun, Guang Zhu, Shunshun Zhou – Materials Science & Engineering A.

45 Effect of boron and carbon addition on microstructure and tribological properties of metastable beta titanium alloy, Ti-10V-2Fe-3Al / Ravinaik Banatha, V. Chandravanshib, A. Bhattacharjeeb, T.K. Nandyb, G.V.S. Nageswara Raoa - Materials Today: Proceedings 18 (2019) 2700–2707.

46 Microstructure and mechanical properties of laser welded Ti-10V-2Fe-3Al (Ti1023) titanium alloy / Ahmad Chamanfar, Meng-Fu Huang, Timotius Pasang, Masahiro Tsukamoto, Wojciech Z. Misiolek – Journal of Material Research and Technology 2019

47 Международный стандарт ISO 45001 первая редакция 2018-03-12
А. Горбунов, Ред. 04.05.2018

48 Indenter load effects on creep deformation behavior for Ti-10V-2Fe-3Al alloy at room temperature / Xinkai Ma, Fuguo Li, Chen Zhao, Guang Zhu, Weina Li, Zhankun Sun, Zhanwei Yuan – Journal of Alloys and Compounds, 2017

49 План ликвидации аварий на 2020 г. цеха по производству титановых слитков и сплавов АО «УКТМК».

50 Deformation behaviour and mechanisms during hot compression at supertransus temperatures in Ti-10V-2Fe-3Al / Juan Zhao, Jie Zhong, Fei Yan, Fang Chai, Matthew Dargusch – Journal of Alloys and Compounds, Volume 710, 2017, Pages 616-627.

51 Spall strength and fracture behavior of Ti-10V-2Fe-3Al alloy during one-dimensional shock loading / Yu Ren, Zhiyong Xue, Xiaodong Yu, Chengwen Tan, Fuchi Wang, Hongnian Cai – International Journal of Impact Engineering, Volume 111, 2018, Pages 77-84.

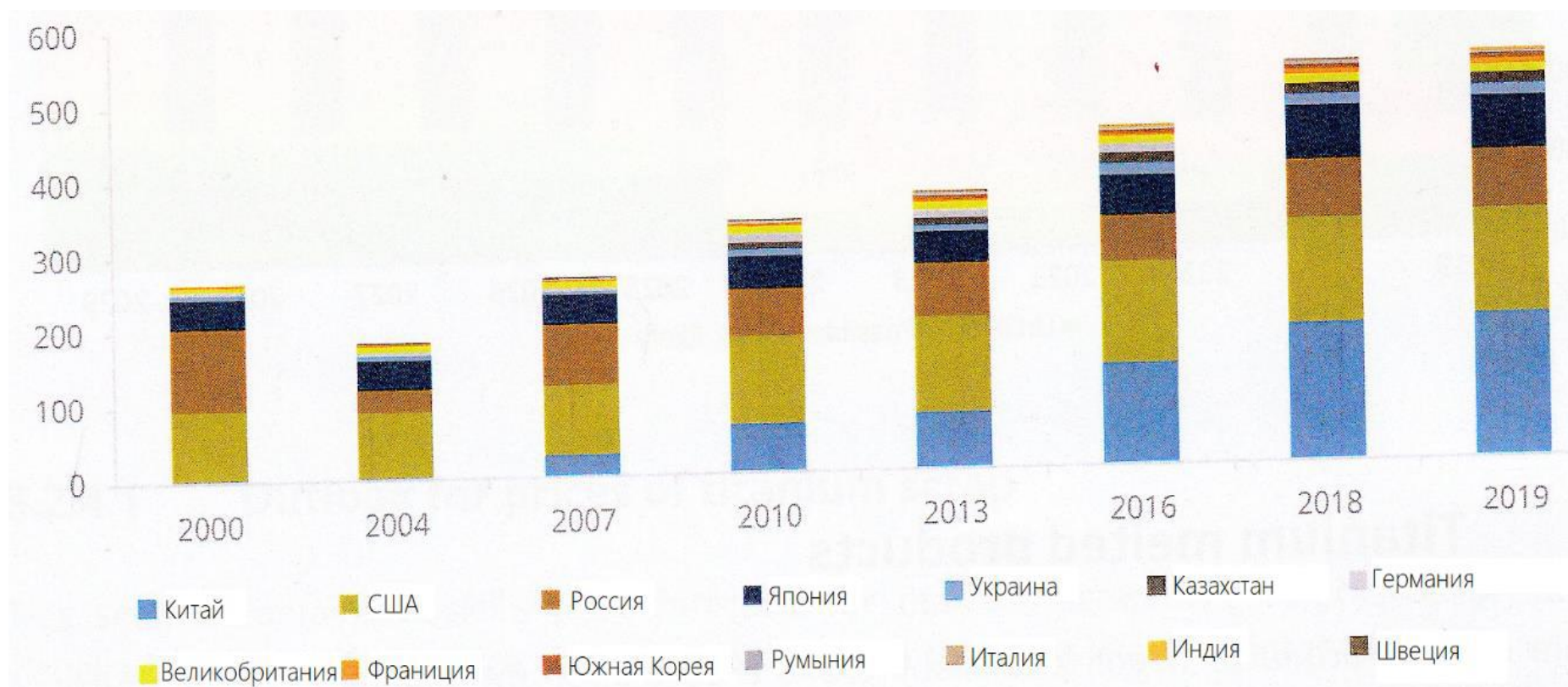
52 Электролитическое рафинирование титана в расплавленных средах / Коллектив авторов под ред. В. Г. Гопи-енко, Л. Н. Антипина, Ю. Г. Олесова. - М.: Металлургия, 1972. - 95 с.

53 Preparation of high-purity titanium in CaCl₂-TiCl₂ melts / Kang Minho, Song Jian-xun, Zhang Long, Liu Yong et al. // Electroplat. and Finish, 2014. - 33. - № 23. - P. 10081011.

54 Получение высокочистых титана, циркония и гафния методом йодидного рафинирования в промышленных условиях / [М. Л. Коцарь, О. Г. Моренко, М. Г. Штуца и др.] / Новые высокочистые материалы: тез. докл. симпозиума - Н. Новгород, 2008. - С. 34-35.

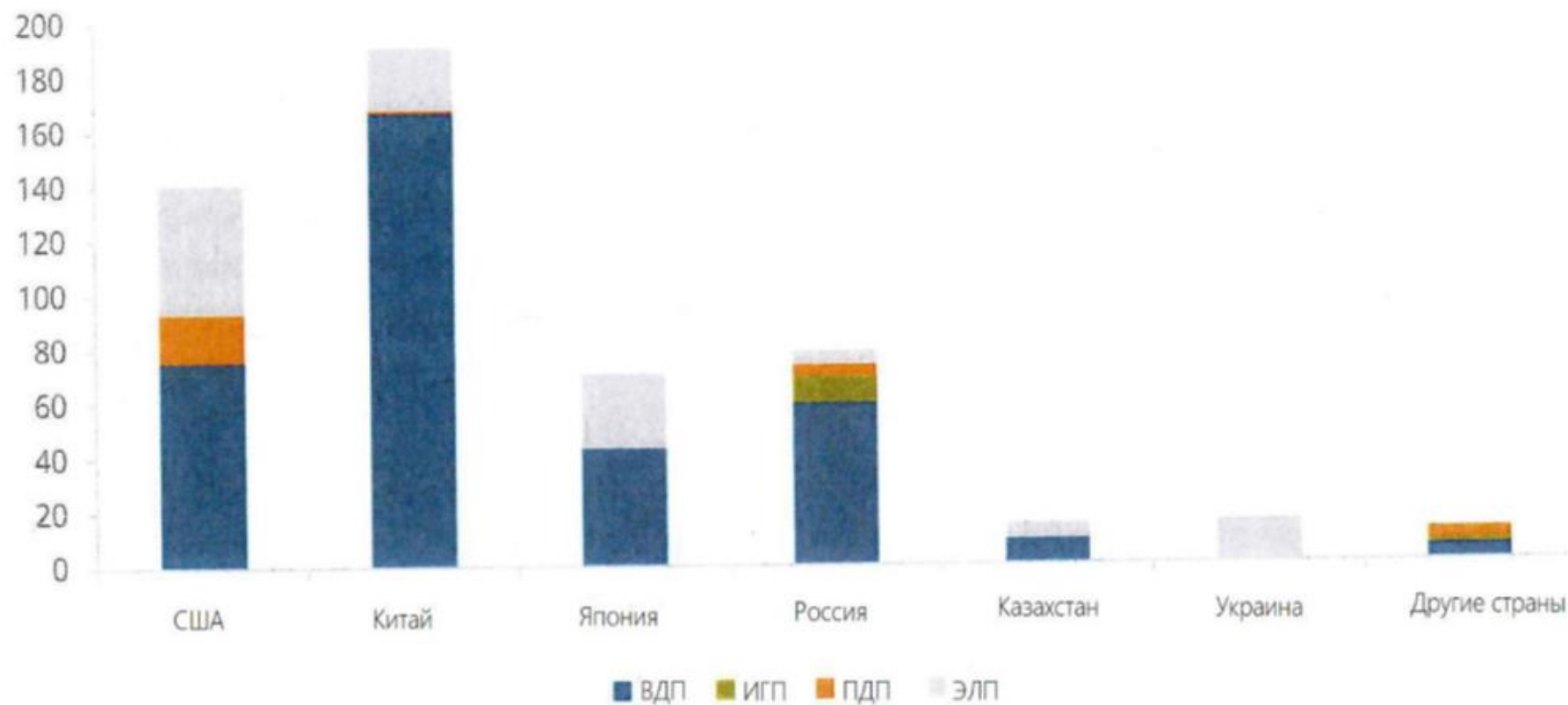
Приложение А

Диаграмма производственной мощности титановых слитков и сплавов в разрезе стран, в период с 2000-2019 гг. (тыс. тонн в год)



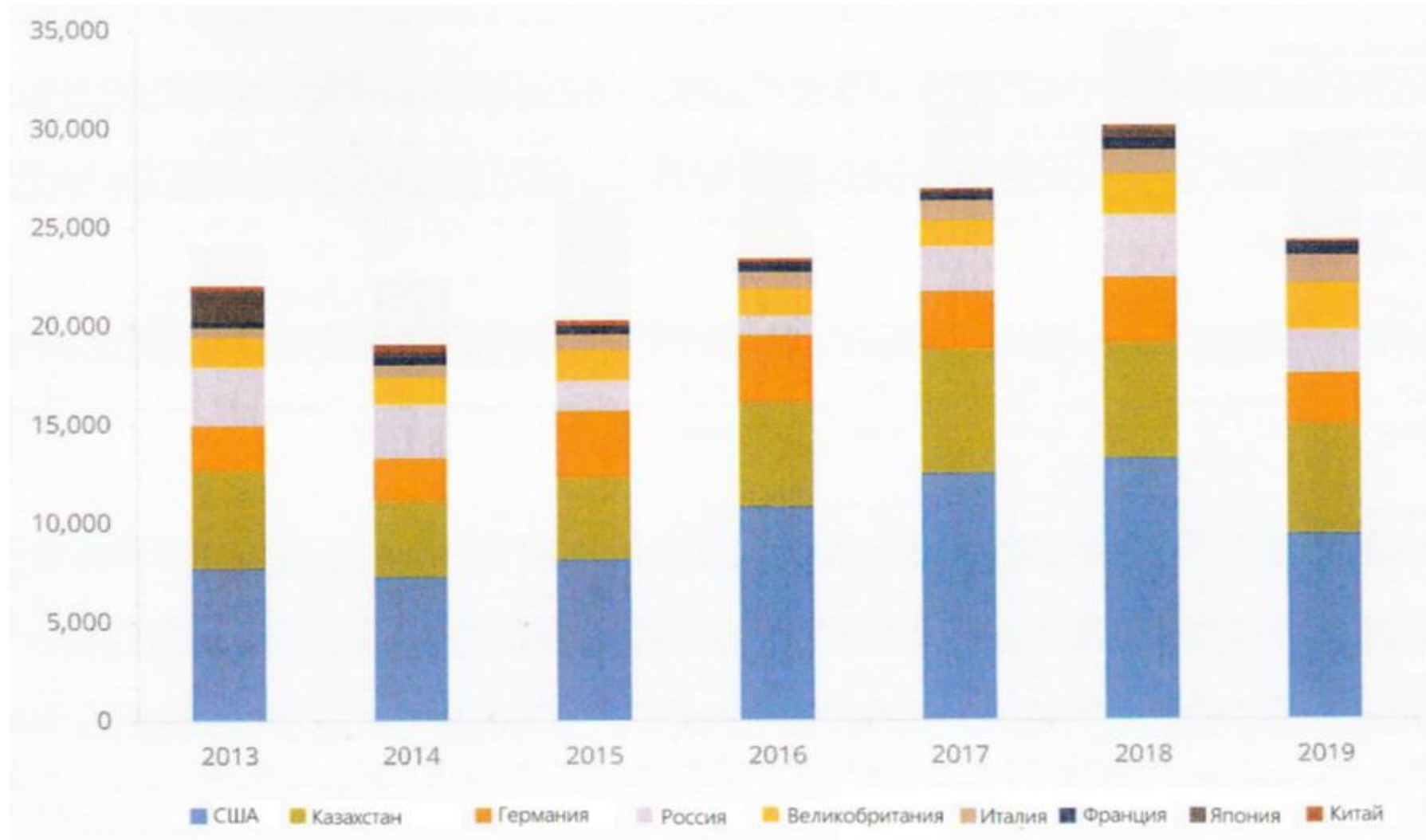
Приложение Б

Диаграмма производственных мощностей стран, по видам технологий получения титановых сплавов за 2019 год (тыс. тонн в год)



Приложение В

Диаграмма экспорта продуктов плавки по странам-производителям в период с 2013 г. по 2019 г.



Приложение Г

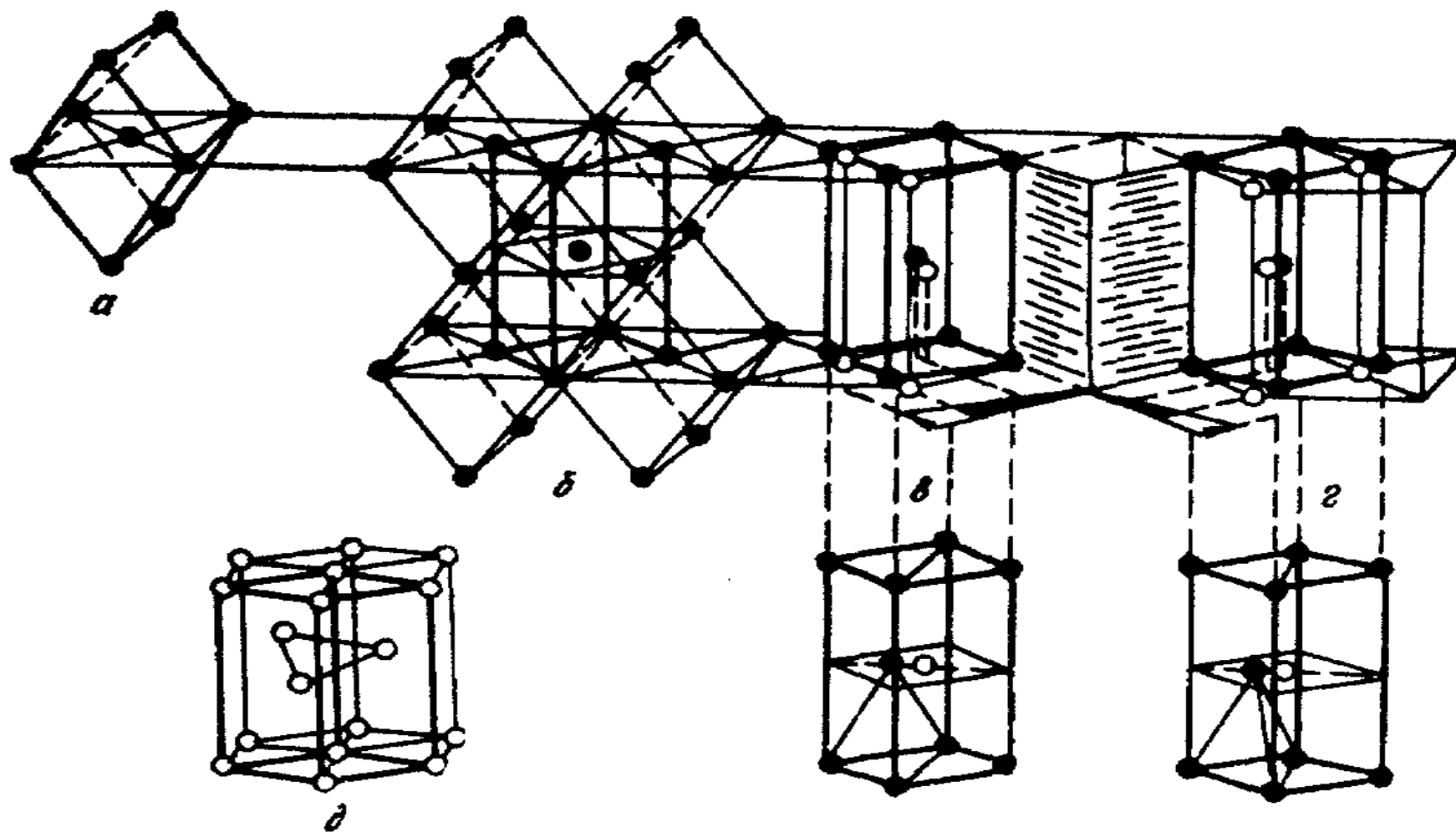
Характеристики сырья, материалов, полупродуктов и энергоресурсов

№ п/п	Наименование сырья и материалов	Стандарт (национальный, межгосударственный), технические условия	Краткое описание
1	Титангубчатый марок Grade 1, Grade 2, Grade 5, Grade 23	ГОСТ 17746 Спецификация TGS-10	Химическое обозначение: Ti. Атомная масса: 47,9. Дробленый материал стального цвета. Температура плавления 1660±10°C. Температура кипения 3262°C. Обладает высокой химической активностью при повышенных температурах. При нагреве до 600°C покрывается оксинитридной пленкой. Легко адсорбирует влагу, что приводит к увеличению содержания кислорода, азота, водорода. Интенсивность взаимодействия с влагой зависит от температуры окружающей среды и наличия хлоридов в продукте.
2	Порошок железный	ГОСТ 9849-86	Химический знак: Fe. Атомная масса: 55,8. Светло-серый мелкозернистый металлический порошок.
3	Алюмо-ванадиевая лигатура с добавлением углерода	Спецификация V-Al	Серебристо-серые гранулы фракции 0,25-6,3 мм.

№ п/п	Наименование сырья и материалов	Стандарт (национальный, межгосударственный), технические условия	Краткое описание
4	Алюмо-ванадиевая лигатура с добавлением железа		
5	Алюминий в гранулах	ГОСТ 295-98	Химический знак: Al. Атомная масса: 27. Высокой электропроводности и теплопроводности. Легкий. При нормальных условиях алюминий покрыт тонкой и прочной оксидной пленкой. Серебристые гранулы фракцией 1,5-3 мм и 5-15 мм.
6	Диоксид титана (TiO ₂)	Спецификация TiO ₂	Химическая формула TiO ₂ . Молекулярная масса 79,9. Амфотерный оксид четырех валентного титана. Основной продукт титановой индустрии. Белый порошок. Плотность 2,6 г/см ³ . Без запаха, не самовозгораемый, не взрывоопасный, не токсичный.

Приложение Д

Схема перехода атома титана из β -фазы в α -фазу.



Приложение Е

Влияние элементов на температуру полиморфного превращения титанового сплава

Элемент	Снижение температуры полиморфного превращения	Повышение температуры полиморфного превращения
Ванадий	12 °С на каждый процент ванадия	-
Железо	18 °С на каждый процент железа	-
Алюминий	-	1,7-2,0 °С на каждые 0,1% алюминия
Кислород	-	2,2-2,3 °С на каждые 0,01% кислорода
Азот	-	5,57 °С на каждые 0,01% азота

Приложение Ж

Требования спецификаций

MTL-3105 компании Сафран (Франция) и AQA-5102 компании Ауберт Дюваль (Франция)

Элементы	Спецификация стандартных сплавов марки Ti-6Al-4V		Спецификация сплавов марки Ti-10V-2Fe-3Al		Отклонение	
	Максимум, %	Минимум, %	Максимум, %	Минимум, %	Между максимальными пределами, %	Между минимальными пределами, %
Al	6.75	6.15	3.40	3.0	+3,35	+3,15
Fe	0.25	-	2.20	1.8	-1,95	-1,8
V	4.5	3.0	10.0	9.0	-5,5	-6
O	0.21	0.15	0.13	0.085	+0,08	+0,065
H	0.0030	-	0.0030	-	0	-
N	0.030	-	0.015	-	0,015	-
C	0.030	-	0.010	-	0,020	-

Приложение И

Расчетный состав титановых электродов

Наименование шихтового материала	Количество, кг			
	1023/1	1023/2	1023/3	1023/4
Al гранулы	17,3	17,3	17,3	17,3
V-Al-C лигатура	50	50	50	50
V-Al-Fe лигатура	588,4	588,4	588,4	588,4
TiO2 диоксид титана	8,3	8,5	8,6	8,6
Fe порошок	16,4	16,5	15,7	15,4
Титан губчатый	3819,7	3819,4	3819,9	3820,3
ИТОГО	4500	4500	4500	4500
Наименование шихтового материала	Количество, кг			
	1023/5	1023/6	1023/7	1023/8
Al гранулы	17,3	17,3	17,3	17,3
V-Al-C лигатура	50	50	50	50
V-Al-Fe лигатура	588,4	588,4	588,4	588,4
TiO2 диоксид титана	8,5	8,6	8,4	8,2
Fe порошок	16,5	15,7	16,3	16
Титан губчатый	3819,4	3819,9	3819,6	3820,1
ИТОГО	4500	4500	4500	4500
Наименование шихтового материала	Количество, кг			
	1023/9	1023/10	1023/11	1023/12
Al гранулы	17,3	17,3	17,3	17,3
V-Al-C лигатура	50	50	50	50
V-Al-Fe лигатура	588,4	588,4	588,4	588,4
TiO2 диоксид титана	8,1	8,6	8,4	7,4
Fe порошок	16,4	16,5	15,7	15,4
Титан губчатый	3819,9	3819,3	3819,7	3821,5

ИТОГО	4500	4500	4500	4500
Наименование шихтового материала	Количество, кг			
	1023/13	1023/14	1023/15	1023/16
Al гранулы	17,3	17,3	17,3	17,3
V-Al-C лигатура	50	50	50	50
V-Al-Fe лигатура	588,4	588,4	588,4	588,4
TiO ₂ диоксид титана	8,1	8,3	8,6	8,6
Fe порошок	16,5	16,5	15,6	15,8
Титан губчатый	3819,7	3819,2	3820,0	3819,9
ИТОГО	4500	4500	4500	4500
Наименование шихтового материала	Количество, кг			
	1023/17	1023/18	1023/19	1023/20
Al гранулы	17,3	17,3	17,3	17,3
V-Al-C лигатура	50	50	50	50
V-Al-Fe лигатура	588,4	588,4	588,4	588,4
TiO ₂ диоксид титана	8,2	8,5	8,6	8,6
Fe порошок	16,1	16,8	15,2	15,5
Титан губчатый	3819,3	3819,1	3820,1	3820,2
ИТОГО	4500	4500	4500	4500

Приложение К

Результаты химического анализа сплавов

№ сплава	Al,%				V,%				Fe,%			
	Верх	Середина 1	Середина 2	Низ	Верх	Середина 1	Середина 2	Низ	Верх	Середина 1	Середина 2	Низ
Требования спецификации	2,95-3,35%				9,50-9,90%				1,80-2,10%			
1023/1	3,11	3,14	3,20	3,21	9,81	9,74	9,78	9,79	2,08	1,94	1,86	1,84
1023/2	3,13	3,13	3,12	3,14	9,54	9,56	9,60	9,66	1,86	1,88	1,90	1,94
1023/3	3,09	3,10	3,13	3,19	9,88	9,80	9,80	9,73	2,02	1,94	1,86	1,83
1023/4	3,13	3,14	3,12	3,13	9,83	9,88	9,76	9,65	1,91	1,90	1,89	1,83
1023/5	3,11	3,14	3,20	3,21	9,81	9,74	9,78	9,79	2,0	1,94	1,86	1,84
1023/6	3,13	3,13	3,12	3,14	9,54	9,56	9,60	9,66	1,89	1,88	1,90	1,94
1023/7	3,09	3,10	3,13	3,19	9,88	9,80	9,80	9,73	2,01	1,94	1,86	1,83
1023/8	3,13	3,14	3,12	3,13	9,83	9,88	9,76	9,65	1,93	1,90	1,89	1,82
1023/9	3,11	3,14	3,20	3,21	9,81	9,74	9,78	9,79	1,91	1,94	1,86	1,82
1023/10	3,13	3,13	3,12	3,14	9,54	9,56	9,60	9,66	1,93	1,88	1,90	1,94
1023/11	3,09	3,10	3,13	3,19	9,88	9,80	9,80	9,73	1,95	1,94	1,86	1,83
1023/12	3,13	3,14	3,12	3,13	9,83	9,88	9,76	9,65	1,96	1,90	1,89	1,83
1023/13	3,11	3,14	3,20	3,21	9,81	9,74	9,78	9,79	1,98	1,94	1,86	1,85
1023/14	3,13	3,13	3,12	3,14	9,54	9,56	9,60	9,66	1,92	1,88	1,90	1,94
1023/15	3,09	3,10	3,13	3,19	9,88	9,80	9,80	9,73	1,91	1,94	1,86	1,83
1023/16	3,13	3,14	3,12	3,13	9,83	9,88	9,76	9,65	1,97	1,90	1,89	1,83
1023/17	3,11	3,14	3,20	3,21	9,81	9,74	9,78	9,79	2,02	1,88	1,86	1,84
1023/18	3,13	3,13	3,12	3,14	9,54	9,56	9,60	9,66	1,86	1,85	1,90	1,94
1023/19	3,09	3,10	3,13	3,19	9,88	9,80	9,80	9,73	2,02	1,91	1,86	1,83
1023/20	3,13	3,14	3,12	3,13	9,83	9,88	9,76	9,65	1,91	1,89	1,89	1,83

Приложение Л

Результаты химических анализов проб с внутренних поверхностей на срезах от 4-х экспериментальных сплавов

№ сплава	Ti, %			Al, %			V, %			Fe, %			O, %		
	Верх	Серед.	Низ	Верх	Серед.	Низ	Верх	Серед.	Низ	Верх	Серед.	Низ	Верх	Серед.	Низ
Требования спецификации	Не регламентировано			2,95-3,35%			9,50-9,90%			1,80-2,10%			0,090-0,125%		
Заданные значения	-			3,25%			9,7%			1,95%			0,105%		
1023/1	84,97	85,33	85,35	2,96	3,01	3,04	9,85	9,69	9,68	2,11	1,85	1,80	0,11	0,12	0,13
1023/2	84,96	85,31	85,25	2,98	3,02	3,07	9,81	9,69	9,72	2,13	1,86	1,83	0,12	0,12	0,13
1023/3	84,88	85,16	85,32	2,99	3,14	3,12	9,90	9,72	9,62	2,12	1,86	1,82	0,11	0,12	0,12
1023/4	84,96	85,09	85,33	3,09	3,23	3,12	9,88	9,71	9,62	1,95	1,85	1,81	0,12	0,12	0,12
1023/5	84,98	85,15	85,12	3,15	3,15	3,18	9,85	9,71	9,75	1,91	1,88	1,83	0,11	0,11	0,12
1023/6	85,04	85,11	85,13	3,12	3,13	3,20	9,83	9,78	9,73	1,9	1,86	1,82	0,11	0,12	0,12
1023/7	85,01	85,1	85,12	3,13	3,14	3,19	9,83	9,80	9,75	1,92	1,84	1,82	0,11	0,12	0,12
1023/8	85	85,09	85,19	3,14	3,16	3,16	9,83	9,77	9,71	1,91	1,87	1,82	0,12	0,11	0,12
1023/9	85,11	85,1	85,15	3,11	3,14	3,18	9,76	9,78	9,72	1,9	1,86	1,82	0,12	0,12	0,13
1023/10	85,01	85,08	85,14	3,14	3,16	3,17	9,82	9,80	9,76	1,92	1,84	1,81	0,11	0,12	0,12
1023/11	84,99	85,06	85,18	3,15	3,16	3,19	9,81	9,79	9,69	1,93	1,87	1,82	0,12	0,12	0,12
1023/12	85,01	85,07	85,14	3,14	3,18	3,2	9,80	9,76	9,71	1,94	1,88	1,83	0,11	0,11	0,12
1023/13	85,04	85,06	85,07	3,15	3,17	3,19	9,74	9,78	9,79	1,95	1,87	1,82	0,12	0,12	0,13
1023/14	85,07	85,06	85,08	3,14	3,16	3,21	9,76	9,80	9,77	1,92	1,86	1,82	0,11	0,12	0,12
1023/15	85,05	85,08	85,14	3,10	3,13	3,19	9,80	9,80	9,73	1,93	1,87	1,82	0,12	0,12	0,12
1023/16	85,06	85,15	85,2	3,14	3,12	3,17	9,78	9,77	9,68	1,90	1,85	1,83	0,12	0,11	0,12
1023/17	85,07	85,16	85,18	3,14	3,15	3,18	9,76	9,73	9,70	1,91	1,84	1,81	0,12	0,12	0,13
1023/18	85,14	85,09	85,15	3,12	3,14	3,16	9,73	9,78	9,74	1,9	1,87	1,82	0,11	0,12	0,13
1023/19	85,01	85,12	85,21	3,12	3,11	3,15	9,80	9,80	9,73	1,95	1,86	1,80	0,12	0,11	0,11
1023/20	85,03	85,09	85,14	3,11	3,12	3,14	9,81	9,81	9,77	1,93	1,86	1,83	0,12	0,12	0,12

Приложение М

Результаты механических испытаний сплава Ti-10V-2Fe-3Al (растяжение и ударная вязкость)

Номер образца	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU , Дж/см ²
В литом состоянии					
1	939	885	2,5	6,0	-
2	966	910	12,1	17,1	-
3	1010	911	1,8	15,4	-
4	985	951	1,8	7,5	-
Среднее значение	975	914,2	4,5	11,5	
После процесса деформации и термообработки					
1	1189,2	1121,5	11,3	29,5	5,3
2	1191,5	1123,0	12,5	40,1	4,2
3	1195,3	1115,8	13,7	39,1	4,8
4	1207,5	1127,6	12,7	35,2	4,9
Среднее значение	1195,9	1122,0	12,5	35,9	4,8

Приложение Н

Результаты механических испытаний сплава Ti-10V-2Fe-3Al (растяжение и ударная вязкость)

Номер образца	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU , Дж/см ²
В литом состоянии					
1	939	885	2,5	6,0	-
2	966	910	12,1	17,1	-
3	1010	911	1,8	15,4	-
4	985	951	1,8	7,5	-
Среднее значение	975	914,2	4,5	11,5	
После процесса деформации и термообработки					
1	1189,2	1121,5	11,3	29,5	5,3
2	1191,5	1123,0	12,5	40,1	4,2
3	1195,3	1115,8	13,7	39,1	4,8
4	1207,5	1127,6	12,7	35,2	4,9
Среднее значение	1195,9	1122,0	12,5	35,9	4,8

Приложение II

Фрагменты вычислений параметров, полученные при расчете математической модели

S _{э1}	S _{э2}	S _{э3}	Id1	Id2	Id3	U1	U2	U3	V1	V2	V3
196350	273397	373928	19,35	20,93	13,31	21,7	21,3	23,1	0,94259615	0,732236008	0,340459605
196350	273397	373928	19,39	20,84	13,34	24,1	24,3	23,9	0,94454467	0,729087358	0,341226982
196350	273397	373928	19,42	20,77	13,35	24,9	24	23,9	0,946006059	0,726638408	0,341482774
196350	273397	373928	20,04	23,01	13,75	24,7	24,5	23,5	0,976208106	0,805004804	0,351714468
196350	273397	373928	20,06	22,99	13,73	25	24,8	23,7	0,977182366	0,804305104	0,351202883
196350	273397	373928	20,18	22,54	13,71	25	25	23,9	0,983027923	0,788561855	0,350691298
196350	273397	373928	20,16	22,51	13,74	25	25,2	24,2	0,982053664	0,787512305	0,351458675
196350	273397	373928	20,17	22,41	13,77	25,1	25,3	24,3	0,982540793	0,784013805	0,352226052
196350	273397	373928	20,23	22,38	13,76	25,2	25,4	24,4	0,985463572	0,782964255	0,35197026
196350	273397	373928	20,25	22,35	13,74	25,2	25,5	24,5	0,986437832	0,781914705	0,351458675
196350	273397	373928	20,23	22,32	13,71	25,3	25,6	24,5	0,985463572	0,780865155	0,350691298
196350	273397	373928	20,27	22,28	13,74	25,4	25,7	24,5	0,987412091	0,779465755	0,351458675

196350	273397	373928	20,33	22,25	13,74	25,6	25,7	24,6	0,99033487	0,778416205	0,351458675
196350	273397	373928	20,34	22,2	13,72	25,7	25,8	24,6	0,990822	0,776666955	0,350947091
196350	273397	373928	20,34	22,18	13,73	25,9	25,8	24,6	0,990822	0,775967255	0,351202883
196350	273397	373928	20,34	22,15	13,73	26,1	25,9	24,7	0,990822	0,774917705	0,351202883
196350	273397	373928	20,41	22,1	13,73	26,3	25,9	24,8	0,994231908	0,773168456	0,351202883
196350	273397	373928	20,36	22,08	13,75	26,7	26	24,7	0,99179626	0,772468756	0,351714468
196350	273397	373928	20,36	22,04	13,72	27	26	24,7	0,99179626	0,771069356	0,350947091
196350	273397	373928	20,38	22	13,71	27,4	26,1	24,8	0,992770519	0,769669956	0,350691298

Приложение Р

Расчет показателей оценки целесообразности реализации проекта

№ п/п	Наименование статьи	Ед. изм.	Расчетный период						
			2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.
Ситуация "без проекта"									
1	Выручка от реализации сплавов марки Grade-5	млн.тг.	12 695	17 850	17 850	17 850	17 850	17 850	17 850
2	Объем реализации сплавов марки Grade-5	тн	1 950	2 500	2 500	2 500	2 500	2 500	2 500
3	Цена реализации 1 тн. сплавов марки Grade-5	млн.тг./т н.	7	7	7	7	7	7	7
4	Себестоимость 1 тн сплавов марки Grade-5	млн.тг./т н.	4	5	5	5	5	5	5
5	Полная себестоимость сплавов марки Grade-5	млн.тг.	8 445	11 875	11 875	11 875	11 875	11 875	11 875
6	Валовая прибыль	млн.тг.	4 250	5 975	5 975	5 975	5 975	5 975	5 975
7	Расходы периода	млн.тг.	1 435	2 017	2 017	2 017	2 017	2 017	2 017
8	Прибыль до налогообложения	млн.тг.	2 815	3 958	3 958	3 958	3 958	3 958	3 958
9	КПН (20%)	млн.тг.	563	792	792	792	792	792	792
10	Чистая прибыль	млн.тг.	2 252	3 167	3 167	3 167	3 167	3 167	3 167
Ситуация "с проектом"									
1	Капитальные вложения (инвестиции)	млн.тг.	170	177					
2	Выручка от реализации сплавов марки Grade-5	млн.тг.	12 695	17 850	17 850	17 850	17 850	17 850	17 850

№ п/п	Наименование статьи	Ед. изм.	Расчетный период						
			2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.
3	Объем реализации сплавов марки Grade-5	тн.	1 950	2 500	2 500	2 500	2 500	2 500	2 500
4	Цена реализации 1 тн. сплавов марки Grade-5	млн.тг./тн.	7	7	7	7	7	7	7
5	Себестоимость 1 тн сплавов марки Grade-5	млн.тг./тн.	4	5	5	5	5	5	5
6	Полная себестоимость сплавов марки Grade-5	млн.тг.	8 445	11 875	11 875	11 875	11 875	11 875	11 875
7	Выручка от реализации продукции сплавов 10-2-3	млн.тг.	47	152	441	662	882	1 323	1 764
8	Объем реализации сплавов 10-2-3	тн	6	17	50	75	100	150	200
9	Цена реализации 1 тн. сплавов 10-2-3	млн.тг./тн.	8	9	9	9	9	9	9
10	Себестоимость 1 тн сплавов 10-2-3	млн.тг./тн.	5	6	6	6	6	6	6
11	Полная себестоимость сплавов 10-2-3	млн.тг.	32	102	296	444	591	887	1 183
12	Итого выручка от реализации сплавов марки Grade-5 и сплавов 10-2-3	млн.тг.	12 743	18 002	18 291	18 512	18 732	19 173	19 614
13	Итого полная себестоимость сплавов марки Grade-5 и сплавов 10-2-3	млн.тг.	8 477	11 977	12 170	12 318	12 466	12 762	13 057
14	Валовая прибыль	млн.тг.	4 265	6 025	6 121	6 193	6 266	6 411	6 557
15	Расходы периода	млн.тг.	1 435	2 017	2 018	2 019	2 019	2 020	2 022
16	Прибыль до налогообложения	млн.тг.	2 831	4 008	4 103	4 175	4 247	4 391	4 535
17	КПН (20%)	млн.тг.	566	802	821	835	849	878	907

№ п/п	Наименование статьи	Ед. изм.	Расчетный период						
			2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.
18	Чистая прибыль	млн.тг.	2 265	3 206	3 282	3 340	3 397	3 513	3 628
19	Итого прирост чистой прибыли	млн.тг.	12	40	115	173	231	346	461
20	Амортизация	млн.тг.	8	26	35	35	35	35	35
21	Денежный поток от инвестиционной деятельности	млн.тг.	-149	-112	150	208	265	381	496
22	Денежный поток от инвестиционной деятельности с накоплением	млн.тг.	-149	-261	-111	97	362	743	1 239
23	Ставка дисконтирования проекта (WACC)	%	11,67%						
24	Стадия развития проекта		0	1	2	3	4	5	6
25	Коэффициент дисконтирования		1	0,895	0,802	0,718	0,643	0,576	0,516
26	Дисконтированный денежный поток от инвестиционной деятельности	млн.тг.	-149	-100	120	149	171	219	256
27	Дисконтированный денежный поток от инвестиционной деятельности с накоплением	млн.тг.	-149	-249	-129	20	191	410	666
28	Чистый приведенный доход (NPV)	млн.тг.	597						
29	Внутренняя норма доходности (IRR)	%	59%						
30	Индекс прибыльности (PI)		4						
31	Простой срок окупаемости (PB)	год	3,5						
32	Дисконтированный срок окупаемости (DPB)	год	3,9						

Приложение С

Вопросы безопасности жизнедеятельности и охраны труда

Организация безопасности и охраны труда

Требования по безопасности и охране труда устанавливаются нормативными правовыми актами Республики Казахстан, содержащими правила, процедуры и критерии, направленные на сохранение жизни и здоровья работников в процессе их трудовой деятельности.

Организация работы по безопасности и охране труда регламентируется в соответствии с международным стандартом ISO45001 [47].

К обязательным организационным мероприятиям по обеспечению безопасности технологического процесса и охраны труда относятся:

- организация и проведение инструктажей, обучение, аттестация и периодическая проверка знаний по безопасности и охране труда;
- разработка плана ликвидации аварий, проведение тренировок готовности;
- разработка и выполнение графиков планово-предупредительных ремонтов оборудования;
- обеспечение безопасности на рабочих местах, оборудованием, соответствующим нормам безопасности, ограждениями или защитными устройствами, знаками предупреждения;
- обеспечение спецодеждой и другими средствами индивидуальной и коллективной защиты для проведения работы в опасных производственных объектах (участках), в том числе на высоте;
- обеспечение правильной эксплуатации и безопасного обслуживания оборудования и механизмов;
- контроль за организацией и проведением газоопасных работ;
- контроль за соблюдением норм и параметров технологического процесса;
- контроль за подготовкой сдачи в ремонт оборудования и приемкой оборудования после ремонта;
- контроль за приемом, хранением и транспортировкой сырья, материалов, готовой продукции.

К основным правилам безопасного ведения технологических процессов относятся:

- допуск работников к управлению сложным оборудованием и машинами, имеющих удостоверения согласно требованиям специальных правил промышленной безопасности и охраны труда;
- при ведении технологического процесса необходимо содержать в чистоте и не допускать захламленности, загромождения рабочих мест;
- работать только на исправном оборудовании, исправными грузозахватными приспособлениями и тарой, в исправной спецодежде;

- правила использования технологического оборудования должны соответствовать характеристикам обслуживаемого оборудования;
- запрещается работать при неисправности ограждений, полов и площадок;
- при возникновении аварийных ситуаций действовать в соответствии с «Планом ликвидации аварий» [49].

Анализ опасных производственных и вредных факторов

Анализ опасных производственных и вредных факторов производства титановых сплавов тройного переплава методом вакуумно-дуговой плавки представлен в таблице.

Таблица

Участок, деятельность	Опасность	Возможные последствия
Ведение процесса вакуумно-дуговой плавки	Нагретые поверхности	Ожог
	Инфракрасное излучение	Ожог
	Газ (аргон)	Удушье
	Падение при движении по скользкой или неровной поверхности	Телесные повреждения
	Электрический ток	Электротравма, летальный исход
	Падение грузов, предметов	Телесные повреждения
	Наезд транспортных средств	Телесные повреждения
	Движущиеся части машин и механизмов	Телесные повреждения
	Взрыв от течи воды в печь	Телесные повреждения
	Пожар	Ожог
		Отравление
	Падение с высоты	Телесные повреждения
	Выброс отходящих газов	Ожог
	Вакуум	Телесные повреждения
	Падение с высоты	Телесные повреждения
	Электрический ток	Электротравма, летальный исход
Работа с гидрозхватом при перемещении грузов	Падение грузов, предметов	Телесные повреждения
	Нагретые поверхности	Ожог
	Движущиеся части машин и механизмов	Телесные повреждения
Техническое обслуживание	Движущиеся части машин и механизмов	Телесные повреждения

Участок, деятельность	Опасность	Возможные последствия
	Газ (аргон)	Удушье
	Падение при движении по скользкой или неровной поверхности	Телесные повреждения
	Электрический ток	Электротравма, летальный исход
	Падение грузов, предметов	Телесные повреждения
	Падение с высоты	Телесные повреждения
	Наезд транспортных средств	Телесные повреждения
	Вакуум	Телесные повреждения
	Нагретые поверхности	Ожог
	Пожар	Ожог
		Отравление

Меры безопасности при работе с вредными веществами

Для защиты от воздействия вредных и опасных производственных факторов должны применяться: исправные приборы безопасности, системы вентиляции, отопления, освещения, защитные ограждения и блокирующие устройства, плакаты и знаки безопасности.

Спецодежда, спецобувь и другие СИЗ должны быть исправны, чистые и вне рабочее время храниться в специально отведённых для этого местах, при условиях, исключающих их порчу и потерю защитных свойств.

Спецодежда, спецобувь и другие СИЗ должны обеспечивать надежную защиту от воздействия на работающего с вредными веществами, а также соответствовать требованиям стандартов и технических условий на них. Использовать для защиты не соответствующие или неисправные СИЗ запрещается.

Средства индивидуальной защиты: рукавицы, противопыльные респираторы, защитные очки, противошумные средства должны выдаваться в соответствии с установленными нормами на определенный срок.

Для предохранения органов дыхания от действия вредных веществ (газов, паров, пыли, аэрозолей) следует применять противогазы соответствующей фильтрующей коробкой. Каждый работник должен иметь при себе или на рабочем месте противогаз с соответствующей фильтрующей коробкой. В зависимости от назначения, коробки изготавливаются для защиты от различных газов (паров и др.). Необходимо знать, что фильтрующие противогазы применяются при содержании кислорода в воздухе более 16% или концентрации ядовитых газов менее 2%. В других случаях применяются шланговые изолирующие или кислородные изолирующие противогазы.

Для защиты рук от агрессивных веществ необходимо пользоваться перчатками, рукавицами, перчатками в соответствии с выполняемой работой.

Не допускается сливать или высыпать любые вредные вещества в раковину канализации, в колодцы, приемки, на землю, в водоемы, в технологическую тару и емкости.

Характеристика опасных и вредных веществ и меры защиты.

Аргон (Ar) - бесцветный, нетоксичный газ, тяжелее воздуха, не имеющий запаха. Применяется в технологическом процессе для создания инертной среды. Аргон при вдыхании вытесняет из организма кислород, достаточно нескольких вдохов для снижения парциального давления кислорода в крови до критического уровня – наступает потеря сознания, практически всегда внезапно.

Меры безопасности: обеспечение герметичности трубопроводных магистралей с аргоном, обеспечение нормальной работы общеобменной и вытяжной вентиляции, не допускать наличие невентилируемых низко расположенных участков (приямков, колодцев и т.д.).

Хлористый водород (HCl) – бесцветный, удушающий газ, хорошо растворяется в воде с образованием соляной кислоты. Попадает в атмосферу производственных помещений при разгерметизации оборудования, проливах технологических солянокислых растворов. ПДК для хлористого водорода в воздухе рабочей зоны составляет 5 мг/м³.

Хлор (Cl₂)—при нормальных условиях—ядовитый газ желтовато-зеленого цвета, тяжелее воздуха, с резким запахом и сладковатым, «металлическим» вкусом.

Первыми признаками отравления хлором являются боли в грудной клетке, резь в глазах, слезотечение, кашель. При отравлении высокими концентрациями хлора может моментально наступить смерть.

Соляная кислота (водный раствор HCl) - жидкость желтого цвета с резким запахом. Пары соляной кислоты вызывают химические ожоги дыхательных путей и слизистых оболочек. При попадании на кожу соляной кислоты так же получают химический ожог. Допустимая концентрация паров соляной кислоты в атмосфере производственных помещений не более 5 мг/м³.

Низшие хлориды титана (TiCl₂-фиолетового цвета, TiCl₃-серого цвета) - твердые легковоспламеняющиеся вещества. Вредно действуют на органы дыхания и кожу. Накапливается в вакуумных коммуникациях.

Меры безопасности: Индивидуальными средствами защиты органов дыхания являются противогаз с коробкой ФК-5Б (при содержании хлора менее 2% по массе), а также кислородный изолирующий или шланговый противогаз.

Губчатый титан (титановая пыль) пожаро и взрывоопасен.

Температура самовоспламенения губчатого титана, т.е. температура его возгорания без соприкосновения с пламенем и раскаленным телом, зависит от крупности его частиц и составляет 560-1000⁰С (при крупности 0,053-1,700

мм). Нижний концентрационный предел взрываемости (НКПВ), т.е. минимальная концентрация пыли, при которой может произойти взрыв, также зависит от крупности частиц, вида губки (крица, гарниссаж) и составляет 90-840 г/м³.

ПДК пыли титана в рабочей атмосфере не более 10 мг/м³. Системы пылеулавливания должны устанавливаться для поддержания содержания пыли в воздухе рабочей зоны и на переделах ниже этого предельно допустимого значения.

Меры безопасности: Средства защиты органов дыхания-респиратор типа «Лепесток»

Меры предупреждения пожара:

- периодическая влажная уборка пола, рабочих площадок, оборудования; обеспечение нормальной работы местных отсосов от узлов перегрузки титановой губки;

- установка электрооборудования и аппаратуры закрытого исполнения;

- исключение работы с открытым огнем и с искр образующим инструментом.

При возгорании губчатого титана-тушить сухим отработанным электролитом, накрыть асбестовым полотном. Загоревшиеся крупные куски ТГ поместить в стенд для тушения и заполнить аргоном.

Средства индивидуальной защиты.

- костюм хлопчатобумажный ГОСТ 27575-87;

- каска защитная ГОСТ 12.4.207-99;

- рукавицы ХБ – ГОСТ 124.010-75;

- ботинки кожаные ГОСТ 12.4.187-98;

- валенки ГОСТ 18724-88;

- бельё нательное ХБ ГОСТ 25296-03;

- перчатки ХБ ТУ - РСФСР-0300142-45-91;

В комплект индивидуальных средств защиты также входит:

- противогаз в полном комплекте с фильтрующей коробкой марки ФК-5Б;

- очки защитные по ГОСТ 12.4.230.1-2007;

- респиратор «Лепесток» по ГОСТ 12.4.041-01;

- вкладыши против шумные «Беруши 3М» модель 110 по ГОСТ 12.4.051-87.

Санитарно – гигиенические мероприятия

Рабочее место и оборудование должны содержаться в чистоте и порядке. В рабочей зоне должны соблюдаться все санитарно-гигиенические нормы (загазованность, запыленность, температура и другие физические факторы). При несоответствии рабочей зоны санитарным нормам определенного рабочего места, работы на данном рабочем месте должны

приостанавливаться и приняты меры по устранению имеющихся недостатков.

Уборка производственных помещений и производственных отходов должна проводиться своевременно в течение ведения технологического процесса по установленному технологическому регламенту и обязательно – по окончании работ.

Отходы должны убираться в предназначенное место и вывозиться к месту складирования, а в местах возможного газовыделения и запыленности иметь исправную систему вытяжной вентиляции.

Для личного предохранения от заболеваний, необходимо соблюдение следующих санитарно-гигиенических правил:

- перед приемом пищи тщательно мыть руки с мылом. Не употреблять для мытья бензин, керосин, ацетон, химические порошки и др.;
- не вытирать руки использованными обтирочными материалами, так как можно пораниться стружкой или опилками;
- своевременно сдать свою спецодежду в стирку и в починку;
- соблюдать питьевой режим: пить воду только из чистых посуды для питьевой воды. Запрещается пить промышленную воду из кранов, предназначенных для технических нужд;
- принимать пищу только в установленных для этого местах (в буфете, столовой, комнате для приема пищи);
- не пользоваться чужой спецодеждой, спецобувью, средствами индивидуальной защиты и другими вещами, так как это может привести к заболеванию кожи грибковыми болезнями;
- содержать индивидуальный шкаф в бытовых помещениях в чистоте и порядке, не хранить в них пищевые продукты и грязные вещи.
- после работы принимать душ, в бытовых помещениях пользоваться индивидуальными принадлежностями, обработать ступни ног специальным раствором.
- при недомогании обращаться в здравпункт или к врачу, не заниматься самолечением.

Помощь при химических ожогах.

При попадании на открытые участки тела щелочей, кислот необходимо в первую очередь быстро удалить едкие жидкости с пораженного участка тела чистой ветошью, платком, бинтом. Затем смыть обильной струей воды, после чего промыть пораженное место 3% раствором пищевой соды (при поражении кислотами) или раствором уксуса (при поражении щелочью). При попадании большого количества перечисленных жидкостей на одежду ее необходимо быстро снять, принять душ и переодеться в сухую одежду.

При попадании агрессивного вещества в глаза необходимо немедленно промыть глаза проточной водой в течение 10 – 15 минут. При попадании кислоты в глаза после промывания водой продолжить промывание 2% раствором бикарбоната натрия. После удаления большей части щелочи, продолжить промывать глаза раствором поваренной соли еще 30 – 60 минут.

При поражении глаз химическими веществами после тщательного промывания глаз немедленно обратиться к врачу. При попадании агрессивных веществ на одежду, каску, маску противогаза, их следует немедленно аккуратно, во избежание попадания капель со спецодежды и средств защиты в глаза и на открытые участки тела, снять и принять душ.

При отравлении через дыхательные пути вывести пострадавшего из загазованной зоны на свежий воздух или в холодное время в теплое проветренное помещение. Пострадавшему обеспечить полный покой, усадить в удобное кресло или уложить, предохранять от охлаждения. До прихода врача пострадавшего нельзя оставлять без присмотра. При поражении раздражающими газами или парами (хлор, оксиды азота и др.) глубокое дыхание противопоказано. При удушье – ингаляция кислородом.

При попадании яда через рот сделать промывание желудка. Если это не удастся, следует вызвать рвоту, давая пострадавшему пить большое количество теплой воды с несколькими каплями нашатырного спирта. При отравлении едкими жидкостями (кислотами, щелочами) и в случае бессознательного состояния вызывать рвоту нельзя.

При потере сознания и остановке дыхания следует немедленно сделать искусственное дыхание до его восстановления (способом «рот в рот» или с применением специального аппарата, другие способы искусственного дыхания малоэффективны). После полного восстановления дыхания допустимо дыхание кислородом. Объем оказания дальнейшей помощи должен определяться врачом.

Экологические аспекты

В соответствии с целями международного стандарта ISO 14001:2015[35] предпринимаются меры по достижению экологической результативности, контролируется каждое воздействие на окружающую среду. На каждой ступени производства выявляются экологические аспекты (отходы производства, выбросы в атмосферный воздух, сточные воды, потребление энергоресурсов и т.д.).

При проведении процесса тройного переплава методом вакуумно-дуговой плавки значительных экологических аспектов не присутствуют. Данный процесс является менее загрязняющим, предполагает рациональное использование всех ресурсов, позволяет уменьшение отходов и продуктов, образующихся в результате их использования, и обеспечить более приемлемую обработку остаточных отходов.

Приложение Т

Акт внедрения в УК ТМК научно-исследовательской магистерской диссертационной работы

Утверждаю
Президент АО «УК ТМК»



А.Т. Мамутова
«25» 09 2020 г.

АКТ

внедрения результатов научно-исследовательской магистерской диссертационной работы

Настоящим актом подтверждаем, что результаты НИР в рамках магистерской диссертационной работы «Физико-химические исследования титанового сплава тройного переплава 10-2-3 произведенного методом вакуумно-дуговой плавки», выполняемой в АО Усть-Каменогорский титано-магниевый комбинат (далее УК ТМК) совместно с НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева» (далее КазННТУ) в период с марта по апрель 2020 г., внедрены в АО «УК ТМК» с 25.03.20г. по 10.04.20г. в виде промышленных испытаний в части выплавки титановых сплавов Ti-10V-2Fe-3Al методом тройного вакуумно-дугового переплава.

Шихта, состоящая из исходных материалов и лигатуры, перемешивается в миксере, при вращении его вокруг своей оси. Перемешанная шихта подается в матрицу гидравлического пресса двойного действия, где происходит сжатие материала до достижения заданных размеров и формы. Готовые брикеты собираются на стяжном стержне, который используется для сжатия и удержания вместе собранных брикетов.

Сварка брикетов титанового электрода производится на установке плазменной сварки.

Время нахождения каждого губчатого электрода на открытом воздухе от момента окончания сборки до начала откачки ВДП на первый переплав – не более 24 часов. Приварка электрододержателей Ø250 мм осуществлялась в печах ВДП, с выдержкой времени охлаждения приварки – не менее 60 минут под остаточным давлением (ключевой параметр).

Первый переплав экспериментальных электродов проходил в печи ВДП №3; второй переплав – в печи ВДП №4; окончательный (третий) – в печи ВДП №2, без привязки к определённой плавильной станции. Стартовый материал не применялся.

Основной ключевой параметр – скорость плавления титанового сплава, был задан на каждый сплав индивидуально:

- для 1023/1: 14 кг/мин, 12 кг/мин, 4 кг/мин;
- для 1023/2: 8 кг/мин, 8 кг/мин, 4 кг/мин;
- для 1023/3: 14 кг/мин, 12 кг/мин, 3,5 кг/мин;
- для 1023/4: 10 кг/мин, 8 кг/мин, 3,5 кг/мин, соответственно на каждый из переплавов (1-й, 2-й, 3-й).

Остальные 16 сплавов также были сплавлены по рецепту 4-го сплава 1023/4: 10 кг/мин, 8 кг/мин, 3,5 кг/мин.

Первый переplав производился в кристаллизаторе Ø620мм. Первый и третий электрод переplавлен с массовой скоростью 14 кг/мин, второй электрод с массовой скоростью – 8 кг/мин, четвертый – 10 кг/мин. Первые переplавы последующих 16 сплавов марки Ti-10V-2Fe-3Al были произведены по аналогии с 4-м сплавом 1023/4 марки Ti-10V-2Fe-3Al со скоростью плавления 10 кг/мин. Плавка произведена с оставлением остаточного диска высотой не менее 40 мм. Охлаждение 4-х экспериментальных сплавов первого переplавы – 10 часов под остаточным давлением в камере печи ВДП (ключевой параметр).

Средняя скорость плавки в установившейся фазе плавления $7,2 \div 8,8 / 13,5 \div 16,5$ кг/мин для рецептов со скоростями плавки 8 и 14 кг/мин, $9,1 \div 10,9$ кг/мин для рецепта со скоростью плавления 10 кг/мин. Среднее напряжение в установившейся фазе плавления $29,5 \div 36$ В, периодичность работы соленоидной катушки $+2/-5$ сек.

Второй переplав производился в кристаллизаторе Ø700мм. Первый и третий электрод переplавлен с массовой скоростью 12 кг/мин, второй и четвертый электрод с массовой скоростью – 8 кг/мин. Вторые переplавы последующих 16 сплавов были произведены также как на 4-м сплаве 1023/4 со скоростью плавления 8 кг/мин. Плавка произведена с оставлением остаточного диска высотой не менее 40 мм. Охлаждение 4-х экспериментальных сплавов второго переplавы – 7 часов под остаточным давлением в камере печи ВДП.

Средняя скорость плавки в установившейся фазе плавления $7,2 \div 8,8 / 10,8 \div 13,2$ кг/мин для рецептов со скоростями плавки 8 и 12 кг/мин. Среднее напряжение в установившейся фазе плавления $29,5 \div 31,5$ В, периодичность работы соленоидной катушки $+5/-5$ сек.

Третий переplав производится в кристаллизаторе Ø770мм. Первый и второй электрод переplавлен с массовой скоростью 4 кг/мин, третий и четвертый электрод с массовой скоростью – 3,5 кг/мин. Третьи переplавы последующих 16 сплавов были произведены аналогично сплаву 1023/4 со скоростью плавления 3,5 кг/мин. Не допускаются перерывы во время установившейся фазы плавления и режима хот-топпинг (режим выведения усадочных раковин). Плавка с оставлением остаточного диска высотой не менее 40 мм (ключевой параметр). Охлаждение 4-х сплавов окончательного переplавы – не менее 7 часов под остаточным давлением в камере печи ВДП.

Средняя скорость плавки в установившейся фазе $3,8 \div 4,2 / 3,3 \div 3,7$ кг/мин для рецептов со скоростями плавки 4 и 3,5 кг/мин. Среднее напряжение в установившейся фазе $24 \div 26,5$ В, периодичность работы соленоидной катушки $+3/-3$ сек. После перехода ВДП на установившуюся фазу плавления, не допускаются отклонения скорости плавления более, чем $3,6 \div 4,4 / 3,15 \div 3,85$ кг/мин; напряжения – $22,5 \div 27,5$ В. Длительность хот-топпинга – не менее 100 минут.

Таким образом, предлагаемый технический результат по выплавке титановых сплавов Ti-10V-2Fe-3Al показал эффективность исследований:

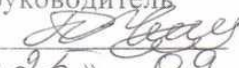
1) Титановые сплавы Ti-10V-2Fe-3Al, производимые на АО «УК ТМК», могут применяться в качестве исходного материала для производства титанового проката, применяемого для изготовления критических деталей аэрокосмической техники;

2) полученные результаты позволяют утверждать, что полученные технологические параметры плавки титанового сплава Ti-10V-2Fe-3Al позволяют производить данные титановые сплавы в промышленных масштабах.

От НАО «КазНИТУ

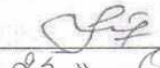
имени К.И. Сатпаева»:

Зав.кафедрой МПТиТСМ, научный
руководитель

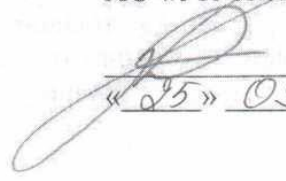
 Г.А. Чепуштанова
« 25 » 09 2020 г.

От АО «УК ТМК»:

Президент АО «УК ТМК»

 А.Т. Мамутова
« 25 » 09 2020 г.

И.о. технического директора
АО «УК ТМК»

 В.Ю. Чувашов
« 25 » 09 2020 г.

Приложение У

Публикация, Сатпаевские чтения 2020

6. Dunn M. Commissioning of the supercells TM world's largest flotation machines // «PROCEMIN 2010» (Gecamin Ltd, Santiago, Chile, 2010). CD-ROM.
7. Лавриненко А.А. Современные флотационные машины для минерального сырья // Горн. техника. – 2008. – С. 186-195.
8. Подкосов Л.Г., Аюпова К.С., Романовская Н.Е. Коллективная: флотация титано-циркониевых песков. Тр. ВИМС, вып. 6, 1961.
9. Никитин А.А., Докшин В.С. Обогащение руд, 1964, № 4.
10. А.с. 942805 СССР, МКИ В 04 С 9/00 Турбоциклон [Текст] / В.Е. Дерябин, В.М. Процак, М.В. Порошин (СССР). – 2997829/23-26: заявл. 27.10.80: опубл. 15.07.82, Бюл. № 26. – 2 с.: ил.

В.А. Карелин, В.В. Шагалов, Н.В. Карелина, Ш.Х. Ле., В.А. Карелин

Титан бар құмдардан флотациялық шөгінділерді технологиясын жасау

Аннотация. Титан бар құмдарды байыту кезінде флотация процесін қолдану қажеттілігі көрсетілген, биік және сульфатты сабынды коллектор ретінде пайдалану ерекшеліктері зерттелген, флотация процесінің схемасы жасалынған, құнды құрамдас бөліктерді көбік өніміне шығаруға мүмкіндік беретін жағдайлар табылған және құрамдас бөліктердің ауыр бөлігі алынған концентратқа бөлінген кезде оны тез бұзу шарттары қарастырылған, көп камералы флотация машиналарын қолдану қажеттілігі негізделген.

Түйінді сөздер: титанмен тұратын құмдар, флотация, биік және сульфатты сабын, тұздыру, көбіктену, флотация реактивтері

V.A. Karelin, V.V. Shagalov, N.V. Karelina, Sh. Le., V.A. Karelin,

Development of technology for flotation concentration of titanium-containing sands

Annotation. During the enrichment of titanium-containing sands, the necessity of using the flotation process is shown, the features of using tall and sulfate soap as collectors are studied, a flotation process scheme is developed, conditions are found that allow the extraction of valuable components into the foam product and the conditions for its rapid destruction when a heavy fraction of components is separated into the resulting concentrate, the necessity of using multi-chamber flotation machines is substantiated

Key words: titanium-containing sands, flotation, tall and sulphate soap, desliming, foaming, flotation reagents

УДК 620.1

А.Т. Мамутова

Научный руководитель – Т.А. Чепуштанова, зав.кафедрой МПТУТSM, доктор PhD, к.т.н., ассоциированный профессор, Satbayev University,

АО «Усть-Каменогорский титано-магний комбинат», Казахстан, г. Усть-Каменогорск

post@uktmp.kz

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛИТКОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ТРОЙНОГО ПЕРЕПЛАВА Ti-10V-2Fe-3Al ПРОИЗВЕДЕННОГО МЕТОДОМ ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ПЛАВКИ

Аннотация. Приведены результаты исследований химического состава, структуры и механических свойств высокопрочного титанового сплава Ti-10V-2Fe-3Al. Показано, что сплав обладает высокими технологическими свойствами при обработке давлением. В связи с чем, из него изготавливают различные виды полуфабрикатов: билеты, плиты, прутки, поковки, которые обычно используют в термически упрочненном состоянии.

Ключевые слова: химический состав, механические свойства, применение титанового сплава Ti-10-2-3, вакуумно-дуговой переплав

На сегодняшний день титан все больше используется во всех сферах и отраслях промышленности. Основным потребителем титана является аэрокосмическая отрасль.

Также военная авиатехника широко использует титан, который рассматривается как стратегический материал.

Отмечается положительная тенденция по расширению применения сплавов на основе титана в гражданских отраслях промышленности, таких как атомная и тепловая энергетика, шельфовая нефтедобыча и медицина.

В рамках государственной программы индустриализации, на комбинате разработана и утверждена Советом директоров «Программа развития АО «УКТМК» на 2012-2022 годы» (далее – Программа), включающая в себя стратегические планы по модернизации производства, увеличению доли казахстанского титана на мировом рынке.

Для АО «УКТМК» одним из приоритетных направлений в реализации Программы является создание производства и сертификация нового сплава Ti-10V-2Fe-3Al (далее – Ti-10-2-3).

В октябре 2015 года производство титановых слитков и сплавов АО «УКТМК» впервые получило сертификацию французской компании «Safran».

Safran – французская промышленная компания, работающая в области электроники и высоких технологий. Образован в результате слияния в 2005 году между производителем авиационных и ракетных двигателей и аэрокосмических компонентов «Snecma» и охранный компанией «SAGEM». Основной деятельностью компании является авиакосмическая и оборонная отрасли.

В 2019 году АО «УКТМК» проведена первая тестовая плавка, с выпуском опытного титанового сплава марки «Ti-10-2-3».

В марте 2020 года на АО «УКТМК» в цехе по производству титановых слитков и сплавов №14 начато производство по выпуску титановых сплавов методом тройного вакуумно-дугового переплава марки «Ti-10-2-3».

Титановые сплавы для авиастроения и авиационного назначения производятся методом двойного и тройного вакуумно-дугового переплава.

Сплавы, производимые методом двойного переплава, используются для изготовления авиационных деталей неответственного назначения, где не требуются высокие показатели механических, литейных свойств, прочности и комплекса эксплуатационных свойств материала.

В основном в мировой практике титановый сплав Ti-10V-2Fe-3Al производится методом тройного переплава, который обеспечивает равномерное распределение элементов, высокий уровень прочности, чистоту химического состава, высокие показатели механических свойств, равномерной макро- и микроструктуры металла для обеспечения механических свойств для высоконагруженных деталей авиационного назначения. Производство слитков методом тройного переплава приводит к удорожанию сплава, однако при этом дает существенный положительный эффект с точки зрения комплекса свойств и модифицирования структуры, литейных свойств.

Основные свойства титанового сплава марки Ti-10-2-3.

Современные титановые сплавы это:

- высокий предел прочности (σ_b) до 1300 МПа;
- высокая жаропрочность до 600°C;
- обеспечение надежности в работе конструкций (на уровне современных требований) по характеристикам трещиностойкости, циклической прочности, жаропрочности и др.;
- низкая плотность 4,5 г/см³;
- высокая удельная прочность и удельная жаропрочность;
- высокая коррозионная стойкость (в 30-50 раз больше, чем у коррозионностойкой стали);
- немагнитность;
- низкий температурный коэффициент расширения;
- хорошая свариваемость всеми видами сварки.

Ti-10-2-3 – высокопрочный технологичный сплав, который используется для получения деталей, предназначенных для работы до 315 °С. Относится к группе псевдо β-сплавов, комплекс механических свойств которых может варьироваться в широких пределах, достигающихся разными методами термической обработки. Имеет высокое сопротивление коррозионному растрескиванию в соленой воде, одинаковой вязкостью на воздухе и в соленой воде. Сплав хорошо прокаливается в сечениях до 125 мм, обладает высокой технологичностью при горячей обработке давлением и способностью к формообразованию.

Исследование механических свойств, химического состава.

Химический состав сплава Ti-10-2-3 по американским спецификациям авиационного назначения AMS приведен в таблице 1. Средние типичные значения интегральных характеристик химического состава: коэффициент β-стабилизации $k_{\beta}=1,1$, структурные эквиваленты по алюминию=4,0% и молибдену=12,1 [2].

По данным американского справочника [3] температура полиморфного превращения (ТПП) соответствует 790-805 °С. Таблица 1 – Химический состав сплава Ti-10-2-3 по спецификациям AMS 4983, AMS 4984, AMS 4986, AMS 4987 [3]:

Таблица 1 – Химический состав сплава Ti-10-2-3

Основные компоненты, % по массе					Примеси (не более, %)				
Ti	V	Fe	Al	Y	C	O	N	H	Прочие
Основа	9,0–11,0	1,6–2,2	2,6–3,4	≤0,05	0,05	0,13	0,05	0,015	0,3

Фазовый состав сплава Ti-10-2-3 в равновесном состоянии после простого отжига представлен ~30-40% α-фазы и ~60-70% β-фазы [2]. Сплав обладает высокими технологическими свойствами при обработке давлением. Из него изготавливают различные виды полуфабрикатов: биллеты, плиты, прутки, поковки, которые обычно используют в термически упрочненном состоянии. Для этого применяют закалку, обработку на твердый раствор или β-отжиг, после чего следует старение или перестаривание (таблица 2).

Таблица 2 – Промышленные режимы термической обработки сплава Ti-10-2-3

Спецификация	Термическая обработка	Закалка			Старение*
		T, °C	t, ч	Охлаждение	
AMS 4983A	Старение для снятия напряжений	•	•	•	480-510
AMS 4984	Закалка + старение	ТПП + (15+40)°C	≥0,5	вода	480-510
AMS 4986	Закалка + старение	ТПП + (15+40)°C	≥0,5	вода	510-540
AMS 4987	Закалка + перестаривание	ТПП + (15+40)°C	≥0,5	вода	565-620

Примечание: * охлаждение на воздухе, ≥ 8 часов.

Механические свойства поковки после стандартной термической обработки должны соответствовать требованиям, приведенным в таблице 3.

Таблица 3 – Гарантированные механические свойства штампованных поволоков сплава Ti-10-2-3 при комнатной температуре [2], [3]

Нормативная документация	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KIC, МПа·м ^{1/2}	Толщина поковки, мм
AMS 4983	1103	1240	4	факультативно	•	<25
AMS 4984	1100	1190	4		44	<75
AMS 4986	1000	1100	6		60	•
AMS 4987	895	965	8		88	•

В 2019 году АО «УКТМК» произвела первый тестовый сплав Ti-10-2-3, методом двойного вакуумно-дугового переплава, диаметром 860 мм, близкой к серийным слиткам (Рисунок 1). Результаты оценки слитка выявила следующие особенности сплава: очень стабильную скорость плавки согласно целевым значениям, хорошее качество поверхности, соответствующий спецификациям химический состав.

В компании Aubert&Duval (Франция), с полученным опытным сплавом Ti-10-2-3, произведены процессыковки и механических испытаний, исследование химического состава.

Результаты химических испытаний сплава Ti-10-2-3 представлены в таблице 4.

Таблица 4 – химический состав тестового сплава марки Ti-10-2-3

Элемент	Верх	Середина 1	Середина 2	Низ
Al	3,12	3,10	3,09	3,10
V	9,58	9,62	9,62	9,85
Fe	1,84	1,88	1,94	2,07
C	0,010	0,010	0,010	0,010
N	0,009	0,009	0,009	0,008
H	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
O	0,110	0,111	0,108	0,108



Рисунок 1 – 1 й Ti-

10-2-3 опытный сплав

Также с тестовым слитком проведены механические испытания, результаты которых указаны на рисунке 2.



Рисунок 2 – Результаты макро-травления верхней части слитка

Результаты макро-травления верхней части слитка показывают, что столбец расплава в стабильном состоянии фазы плавления имеет глубину 120 мм, ванна расплава имеет глубину 200 мм и последняя ванна расплава глубиной 150 мм.

Результаты химического состава слитка, приведенные в таблице 4, также указывают на сегрегацию и неоднородность состава тестового сплава по элементам Fe, V. Данная неоднородность химического состава в дальнейшем влияет на механические свойства и прочность изготавливаемых деталей.

Применение титанового сплава Ti-10-2-3. Сплав Ti-10V-2Fe-3Al применяется для изготовления высоконагруженных деталей авиационного назначения (конструкций

планеров самолетов сплава Ti-10-2-3, шасси, пилонов, дверей, шарниров, цапф, подшипников, деталей вертолетов и др.) [1], [2], [3].

Заключение. На основе обобщения опубликованных литературных данных и данных опытного слитка Ti-10-2-3 произведенного в 2019г. проведены статистические исследования температуры полиморфного превращения, фазового состава и механических свойств деформированных полуфабрикатов из титанового сплава Ti-10V-2Fe-3Al.

Также определено, что наибольшую высокую прочность и комплекс необходимых механических свойств к полуфабрикатам и поковкам изготовленным из титанового сплава Ti-10V-2Fe-3Al придает производство его сплава методом тройного переплава и применение термической обработки: обжиг, старение для снятия внутреннего напряжения, закалка согласно международным стандартам – AMS 4983, AMS 4984, AMS 4986, AMS 4987.

По итогам испытаний ковальной продукции тестового сплава Ti-10-2-3 произведенного на АО «УКТМК» в компании A&D был сделан вывод, что опытный слиток имеет все необходимые характеристики сплава Ti-10-2-3. В 2020 году АО «УКТМК» совместно с компанией A&D, в рамках реализации проекта, начали производство сплавов Ti-10-2-3 методом тройного переплава для получения равномерной структуры.

Литературы:

5. Кершенбаум В.С. Международная инженерная энциклопедия: Международный транслятор современных статей и сплавов / под ред. В.С. Кершенбаума. - М.: Наука и техника. 1992. - 650 с.

6. Ильин А.А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник / А.А. Ильин, Б.А. Колачев, И.С. Полькин. - М.: ВИС-МАТИ. 2009. - 520 с.

7. Boyer R. Materials Properties Handbook. Titanium Alloys. / Ed. by R. Boyer, G. Welsch, E.W. Collings. – OH, USA, ASM International: Materials Park, 1994. – 1176 p.

А.Т. Мамутова

Вакуумды-доғалық балқыту әдісімен өндірілетін Ti-10V-2Fe-3Al титан қорытпасының физика-химиялық зерттелуі

Аннотация. Ti-10V-2Fe-3Al жоғары беріктігі бар титан қорытпасының химиялық құрамы, құрылымы және механикалық қасиеттерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Қорытпаның қысыммен өңдеудің нәтижесінде жоғары технологиялық қасиеттері бар екендігі көрсетілген. Осыған байланысты одан жартылай фабрикаттардың әр түрлі түрлері жасалады: әдетте термиялық қатайтылған күйде қолданылатын дайындамалар, тақтайшалар, шыбықтар, соғу.

Түйінді сөздер: химиялық құрамы, механикалық қасиеттері, Ti-10-2-3 титан қорытпасының қолданылуы, вакуумды-доғалық балқыту әдісі

A.T. Mamutova

Physical and chemical study of triple remelt titanium alloy ingots Ti-10V-2Fe-3Al produced by vacuum arc remelt method

Annotation. Results of study of chemical composition, structure and mechanical properties of high-strength titanium alloy Ti-10V-2Fe-3Al are represented. It is shown that the alloy has high technological properties when processed under pressure. Hence it is used for manufacture of various kinds of semi-finished products: billets, plates, bars, forgings, which are usually used in heat-strengthened condition.

Key words: chemical composition, mechanical properties, application of titanium alloy Ti-10-2-3, vacuum-arc remelt.