

№ 2266

# **Технология вакуумной плавки и литья**

Вакуумная плавка и производство фасонных  
отливок из титана и титановых сплавов

Курс лекций

**№ 2266**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра технологии литейных процессов

# **Технология вакуумной плавки и литья**

Вакуумная плавка и производство фасонных  
отливок из титана и титановых сплавов

Курс лекций

Рекомендовано редакционно-издательским  
советом университета



Москва 2013

УДК 669.083.4  
Т38

Рецензент  
д-р техн. наук, проф. *А.Е. Семин*

**Технология вакуумной плавки и литья** : вакуумная плавка  
Т38 и производство фасонных отливок из титана и титановых сплавов : курс лекций / В.Д. Белов, А.В. Фадеев, А.И. Иващенко, С.О. Бельтюкова. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2013. – 107 с.  
ISBN 978-5-87623-667-8

Приведены основные понятия и устройства вакуумной техники, разработки технологии производства фасонных отливок из титана и его сплавов, методы дуговой и индукционной плавки, принципы экономических расчетов ведения процессов. Рассмотрены способы получения качественных отливок из титана и титановых сплавов, а также основные требования безопасности при их производстве.

Предназначено для магистров, обучающихся по направлению 150400 «Металлургия» по программе подготовки «Инновационные литейные технологии».

**УДК 669.083.4**

**ISBN 978-5-87623-667-8**

© В.Д. Белов,  
А.В. Фадеев,  
А.И. Иващенко,  
С.О. Бельтюкова, 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	5
1. Вакуумная техника.....	6
1.1. История развития вакуумной техники .....	6
1.2. Применение вакуумной техники .....	7
1.3. Теоретические основы вакуумной техники.....	15
1.3.1. Общие понятия .....	16
1.3.2. Принципиальные вакуумные схемы .....	19
1.4. Единицы измерения вакуума. Приборы и средства измерения .....	22
1.5. Вакуумметры. Типы вакуумметров. Течеискатели.....	23
1.6. Вакуумные насосы .....	25
1.7. Вакуумные материалы, конструкции и способы изготовления вакуумных систем .....	35
1.7.1. Натекание .....	35
1.7.2. Современное вакуумное оборудование.....	38
2. Фасонные отливки из титана и его сплавов .....	39
2.1. Общие сведения .....	39
2.1.1. Историческая справка .....	39
2.1.2. Применение титана и его сплавов .....	41
2.1.3. Получение слитков для фасонного литья.....	42
2.1.4. Получение слитков титановых сплавов методом направленной кристаллизации .....	43
2.1.5. Плазменный переплав.....	43
2.1.6. Электронно-лучевой переплав .....	44
2.2. Классификация титановых сплавов. Химический состав и механические свойства литейных титановых сплавов. Виды литья.....	46
2.3. Литейные титановые сплавы.....	48
2.4. Особенности формирования титановых отливок.....	52
2.4.1. Особенности формирования отливок из титановых сплавов .....	52
2.4.2. Выбор способа литья и положения отливок .....	53
2.4.3. Центробежная заливка .....	54
2.4.4. Расположение отливок в заливочных контейнерах (управление процессами питания отливок).....	55
2.4.5. Питающие прибыли .....	58
2.4.6. Влияние на работу прибылей .....	61
2.4.7. Технологические уклоны и напуски .....	62

2.5. Вакуумные печи для производства титанового литья.....	62
2.5.1. Плавка вакуумная дуговая гарнисажная. Конструкция вакуумной дуговой установки НИАТ 833Д.....	62
2.5.2. Вакуумная гарнисажная индукционная плавка для фасонного литья титановых сплавов.....	65
2.5.3. Вакуумная индукционная установка фирмы «Консарк» .....	66
2.5.4. Вакуумная индукционная бестигельная установка УЛВБ .....	69
2.6. Методика проектирования технологии центробежного литья деталей из титановых сплавов .....	75
2.7. Дефекты отливок из титановых сплавов и методы их предупреждения. Аргоно-дуговая сварка и заварка дефектов.....	77
2.7.1. Дефекты отливок .....	77
2.7.2. Аргоно-дуговая сварка и заварка дефектов отливок и деталей.....	80
2.8. Выбивка и механическая обработка отливок. Контроль отливок.....	82
2.8.1. Выбивка отливок .....	82
2.8.2. Контроль отливок .....	85
2.8.3. Механическая обработка плавки и отливок .....	86
2.8.4. Современные методы моделирования и проектирования отливок.....	89
2.9. Подготовка и использование отходов при фасонном производстве титановых отливок.....	90
2.10. Газостатическая обработка отливок. Модифицирование титановых сплавов .....	93
2.10.1. Назначение горячего изостатического прессования.....	93
2.10.2. Оборудование для проведения горячего изостатического прессования.....	94
2.10.3. Порядок проведения газостатической обработки изделий.....	97
2.10.4. Газостатическое уплотнение отливок.....	98
2.10.5. Модифицирование титановых отливок.....	102
2.11. Методика определения норм расхода материалов .....	102
2.12. Техника безопасности при работе с титаном и его сплавами.....	104
Техника безопасности при выполнении работ на вакуумном оборудовании .....	104
Библиографический список.....	106

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

В настоящее время сфера человеческой деятельности, в которой применяются изделия из титана и его сплавов, непрерывно расширяется. Возрастающие требования современной техники и металлургии обуславливают необходимость изучения накопленного научного и практического опыта в области добычи, получения и производства изделий на основе титана.

Внедрение в производство научных разработок и технических достижений тем успешнее, чем выше подготовка инженерно-технических работников металлургического производства, в том числе вузовская подготовка инженеров-литейщиков.

В работе рассмотрены разработки институтов ВИАМ, ВИЛС, МАТИ, НИАТ, предприятий – ОАО «БЛМЗ», АК «РУБИН» «УМПО», ОАО «ПМ», а также зарубежных предприятий в области производства фасонных отливок из титана и его сплавов.

# 1. ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА

## 1.1. История развития вакуумной техники

До середины XVII в. понятие «вакуум», в переводе с латинского означающее «пустота», использовалось лишь в философии. Древнегреческий философ Демокрит одним из «начал мира» считал пустоту. Позднее Аристотель вводит понятие эфира – неощутимой среды, способной передавать давление. В этот период знания о свойствах разреженного газа еще не существовали, но вакуум широко использовался в подъемных пневматических устройствах.

Научный этап развития вакуумной техники начинается с 1643 г., когда в Италии Э. Торричелли, ученик знаменитого Г. Галилея, измерил атмосферное давление. В 1672 г. в Германии О. Герике изобрел механический поршневой насос с водяным уплотнением, что дало возможность исследовать свойства разреженного газа.

Опыты с электрическим разрядом в вакууме привели вначале к открытию электрона, а затем рентгеновского излучения. Важнейшими событиями в этой области стали создание в 1873 г. лампы накаливания с угольным электродом А.Н. Лодыгина и открытие Т. Эдисоном в 1883 г. термоэлектронной эмиссии. С этого момента и начинается наука – вакуумная техника. За небольшой период времени в начале XX в. были изобретены широко применяемые до настоящего времени вакуумные насосы: вращательный, криосорбционный, молярный, диффузионный. К U-образному манометру Торричелли добавились компрессионный, тепловой, ионизационный.

Для получения сверхвысокого вакуума при изучении свойств газов при низких давлениях изобретаются новые насосы (турбомолекулярный, магнитоэлектрический), совершенствуются паромасляные криосорбционные насосы.

При измерении низких давлений применяются анализаторы парциальных давлений, с помощью которых определяют состав и давление каждого компонента остаточных газов.

Сверхвысоковакуумные системы потребовали специальных материалов и конструкций вакуумных систем. Для определения натекания применяются масс-спектрометрический и галоидный методы. Разрабатывается и применяется для расчета вакуумных систем стохастический метод. Достижения криогенной техники нашли широкое применение при получении вакуума. Все более широко применяются мембранные химические насосы и станции.

## 1.2. Применение вакуумной техники

Техническое применение вакуума непрерывно расширяется. Наиболее важной областью его применения является электронная техника: электронные лампы, микросхемы, лучевые трубки, усилительные генераторы и т.д.

Плавка и разлив металлов в вакууме освобождают их от растворенных газов, благодаря чему они приобретают высокую механическую прочность, пластичность, вязкость. Плавка в вакууме позволяет получить «благородные» сорта железа для электродвигателей, медь с низким электрическим сопротивлением, магний, кальций, тантал, платину, титан, цирконий, бериллий, редкие металлы и их сплавы. Спекание в вакууме порошков тугоплавких металлов, таких как вольфрам и молибден, является одним из основных процессов порошковой металлургии. Сверхчистые вещества, полупроводники, диэлектрики получают в вакуумных кристаллизационных установках. Диффузионная сварка в вакууме позволяет получить неразъемные герметичные соединения материалов с сильно различными температурами плавления. Таким способом соединяют керамику с металлом, сталь с алюминием и т.д.

Высококачественное соединение материалов с однородными свойствами обеспечивает электронно-лучевая сварка в вакууме. В машиностроении вакуум применяется при нанесении упрочняющих и износостойких покрытий на режущий инструмент, детали машин.

Химическая промышленность применяет вакуумные сушильные аппараты при производстве химических волокон, полиамидов, полиэтилена. Вакуумные фильтры используются при производстве целлюлозы, бумаги, смазочных масел. В производстве красителей применяются кристаллизационные вакуумные аппараты.

Оптическая промышленность перешла с химического серебрения при получении зеркал на способ вакуумного алюминирования. Просветленную оптику, защитные слои на оптических линзах и интерференционные фильтры получают напылением тонких слоев в вакууме.

В пищевой промышленности для длительного хранения продуктов используют вакуумную сушку вымораживанием. В сельском хозяйстве широко применяются вакуумные доильные аппараты; в быту широко используются пылесосы; на транспорте – вакуумные усилители тормозных систем, устройства подачи топлива в карбюраторах. В космической технике вакуум используется для имитации космических условий и испытания спутников. В медицине вакуум применяется для сохранения гормонов, сывороток, витаминов, при получении антибиотиков, анатомических и бактериологических препаратов.

## Плавильное оборудование

### Вакуумная плавильная установка ВПДС-1

Вакуумная установка с донным сливом ВПДС-1 (рис. 1.1) предназначена для литья деталей корпусов из жаропрочных сплавов и сталей, работающих под давлением до  $60 \cdot 10^5$  Па.



Рис. 1.1. Вакуумная плавильная установка ВПДС-1

Основные технические характеристики вакуумной плавильной установки ВПДС-1 приведены ниже:

Вакуум рабочий, Па .....	$665 \cdot 10^{-3}$
Температура расплава, °С.....	1650
Температура печи нагрева форм, °С.....	1250
Емкость тигля по стали, кг .....	15... 25
Габаритные размеры тигля (наружные), мм:	
диаметр.....	230
высота.....	240
Размеры печи для нагрева форм (внутренние), мм:	
диаметр.....	500
высота.....	600
Скорость перемещения формы при кристаллизации, мм/мин .....	5... 15
Скорость перемещения формы, мм/мин.....	300
Общая мощность печи, кВт.....	350
Габаритные размеры печи, мм:	
длина.....	7750
ширина.....	5350
высота.....	2550

## ***Вакуумная плавильная установка УППФ-У***

Вакуумная индукционная установка УППФ-У предназначена для литья изделий с поликристаллической структурой из жаропрочных сплавов в условиях серийного производства и для отработки сложных технологий в опытном производстве (рис. 1.2, 1.3).



Рис. 1.2. Общий вид вакуумной плавильной установки УППФ-У

Основные технические характеристики вакуумной установки УППФ-У приведены ниже:

Рабочий вакуум, Па.....	0,67
Натекание <sup>1</sup> , л·мкм рт.ст./с.....	15
Максимальное давление инертного газа (аргона) в плавильной камере, Па.....	0,4·105
Производительность расчетная, форм/ч.....	3
Емкость сменных тиглей, кг.....	15, 25, 30
Максимальная температура расплава, °С.....	1800
Рабочая температура печи подогрева форм, °С.....	1100
Максимальная высота форм под заливку, мм.....	700
Максимальный диаметр форм под заливку, мм.....	500
Габаритные размеры, мм.....	4700 × 6100 × 3830

<sup>1</sup> Принятая размерность соответствует градуировке приборов.