

Transformation processes of non-metallic inclusions and structure in metal electroslag technology with the raised sulfur content are considered. It is established, that in fusion zones other form of non-metallic inclusions and other microstructure are formed.

УДК 621.745.558.669.295

Н. Н. Кузьменко, Л. Д. Кулак, Н. И. Левицкий\*, В. И. Мирошниченко\*

Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев

\*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## Способы выплавки сплавов систем Ti-Si и Ti-Si-X

Приведены технические характеристики электронно-лучевой гарнисажной установки, универсального плазменно-дугового агрегата и экспериментальной вакуумно-дуговой печи, которые используют для выплавки серийных титановых сплавов. Проведенные опытные плавки показали, что выбор плавильного агрегата для получения качественных литых заготовок из сплавов систем Ti-Si и Ti-Si-X обусловлен массой, конфигурацией необходимых заготовок, наличием шихтовых материалов, стоимостью конечной продукции и т. п.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая установка, плазменно-дуговой агрегат, вакуумно-дуговая печь, сплавы систем Ti-Si и Ti-Si-X

В настоящее время возникла потребность в материалах, которые бы объединяли в себе малый удельный вес, значительные прочность и пластичность при комнатной температуре, жаропрочность и жаростойкость при температурах выше 600 °С. Существует также большой спрос на материалы с высоким модулем упругости. Одним из направлений решения данной проблемы есть создание титановых сплавов и композитов на основе системы Ti-Si с содержанием кремния, который превышает термодинамически стабильную величину в твердом растворе. Такие материалы имеют многофазную структуру, где упрочнение титановой матрицы тугоплавким соединением  $Ti_5Si_3$  происходит естественным путем в процессе кристаллизации. Сплавы данной системы являются перспективными для создания нового класса материалов с высоким уровнем физико-механических характеристик. В связи с этим решающее значение для обеспечения необходимого состава и однородности структуры, а также стабильности физико-механических свойств приобретает металлургическая стадия получения данных материалов в количестве, необходимом для проведения широкомасштабных исследований и практического применения.

Исходя из требований к выплавленному материалу и реальных возможностей, были испытаны три способа получения сплавов систем Ti-Si и Ti-Si-X

для выбора в дальнейшем оптимальных вариантов: электронно-лучевая, вакуумно-дуговая и плазменно-дуговая плавки. Технические характеристики электронно-лучевой литейной гарнисажной установки, универсального плазменно-дугового агрегата и рабочие параметры вакуумно-дуговой установки представлены в табл. 1-3.

При выборе конкретных составов, перспективных с точки зрения их практического использования, были взяты во внимание результаты исследований сплавов систем Ti-Si и Ti-Si-Zr в широком диапазоне концентраций кремния и циркония (0÷8,5 %мас. Si и

Таблица 1  
Технические характеристики электронно-лучевой литейной установки на базе печи ИСВ-004

Наименование характеристики	Значение
Объем плавильной камеры, м <sup>3</sup>	2,2
Количество электронно-лучевых пушек, шт.	1
Максимальная мощность пушки, кВт	200
Рабочее давление в плавильной камере, Па	0,13
Давление в камере катода пушки, Па	0,0013
Затраты воды на охлаждение установки, м <sup>3</sup> /ч	10
Затраты воды на охлаждение тигля, м <sup>3</sup> /ч	2,4
Время достижения рабочего давления в камере после разгерметизации, ч	2

## Технические характеристики универсального плазменно-дугового агрегата базовой модели УПДА

Наименование характеристики	Значение
Емкость тигля, кг	1-45
Мощность плазмотрона, кВт	20-50
Давление в плавильной камере, атм.	10 <sup>-5</sup> -6,0
Скорость плавления металла, кг/мин	0,5-1,5
Производительность при рафинировании расплава, кг/ч	до 500
Плазмообразующий газ	Ar, He, N, воздух
Затраты плазмообразующего газа, л/мин	3-20
Типы плавильных тиглей	гарнисажный, графитовый, керамический
Способы разлики металла	вакуум, защитная атмосфера, условия регулируемого давления на воздухе
Виды металлов и сплавов	цветные, черные, тугоплавкие металлы и сплавы
Способы плавки	плазменной дугой прямого или подобного действия
Способы перемешивания металла в плавильном тигле	конвективный, электромагнитный, механический и их комбинации

Таблица 2

электромагнитного перемешивания расплава. В качестве шихтовых материалов использовали отходы сплава ВТ1-0, кремний марки КРО и йодидный цирконий. Слив расплава осуществляли поворотом тигля на 90° в графитовую цилиндрическую форму Ø 100 мм. Химический состав выплавленных сплавов представлен в табл. 4, а внешний вид слитка – на рис. 1.

**Плазменно-дуговая плавка.** Выплавку экспериментальных титановых сплавов проводили на универсальном плазменно-дуговом агрегате (УПДА) с использованием графитового гарнисажного тигля с применением электромагнитного перемешивания расплава. Была использована исходная шихта, аналогичная той, что и для метода ЭЛП. Слив жидкого металла в графитовую литейную форму осуществляли за счет поворота корпуса плавильно-сливного агрегата на 100°. Были получены слитки массой 2,5-3 кг, диаметром 60 мм. Химический состав выплавленных слитков представлен в табл. 5, а их внешний вид – на рис. 2.

Таблица 3

## Рабочие параметры вакуумно-дуговой плавки с расходуемым электродом

Напряжение, В	Сила тока, кА	Характер расходуемого электрода	Диаметр расходуемого электрода, мм	Переplав
28-32	1,4-1,6	прессованный	40	первый
28-32	1,8-1,9	компактный	40	второй

0÷10 %мас. Zr) [1-3] и собственных исследований влияния кремния в аналогичном диапазоне на структуру и механические свойства литых сплавов титана массой 80-100 г, полученных методом вакуумно-дугового переplавки на лабораторной установке с медной водоохлаждаемой подиной.

**Электронно-лучевая плавка (ЭЛП).** Данный метод выплавки, являясь одним из перспективных способов получения титановых сплавов [4], имеет ряд особенностей. Его уникальность, по сравнению с другими упомянутыми нами методами плавки, состоит в концентрированном подведении энергии высокой удельной мощности, которая служит причиной формирования физико-механических свойств сплавов в технологической цепи шихта – расплав – литой материал [5]. Учитывая то, что элементы имеют разные физико-химические свойства (температуру плавления, удельный вес, упругость пара), выплавка многокомпонентных сплавов, в состав которых входят такие элементы, нуждается в применении определенных технологических приемов, обеспечивающих получение заданного химического состава сплава.

Выплавку экспериментальных титановых сплавов проводили на электронно-лучевой литейной установке, созданной на базе стационарной вакуумно-индукционной печи ИСВ-004. Водоохлаждаемый плавильный тигель установки оснащен системой

цикл установки включает в себя такие операции: подготовку расходуемого электрода; герметизацию и вакуумирование установки; плавку и охлаждение слитка.

В качестве исходной шихты использовали губчатый титан марки ТГ 110М (содержание примесей представлено в табл. 6), лигатуру Ti-50 %мас. Si и измельченную стружку йодидного циркония. Для получения равномерного химического состава в конечных слитках массой 1,5-1,6 кг использовали схему двукратного переplавки. Расходуемые электроды для первого переplавки изготавливали из сыпучей шихты, для второго – ковкой расходуемых электродов первого переplавки до Ø 40 мм, полученных электродуговой плавкой.

Таблица 4

## Химический состав сплавов Ti-Si, полученных электронно-лучевой плавкой

Номер плавки	Маркировка	Содержание элементов, мас. %				
		Si	Zr	B <sub>2</sub>	C	Fe
502	IM-1	5,0	14,0	0,021	<0,1	<0,1
515	IM-2	1,9	-	0,022	<0,1	<0,1
522	IM-3	2,9	-	0,019	<0,1	<0,1
607	IM	2,4	4,5	0,020	<0,1	<0,1

Примечание: Ti – основа



Рис. 1. Внешний вид слитков после ЭЛП и механической разрезки



Рис. 2. Внешний вид слитка после плазменно-дуговой выплавки

Выплавку сплава Ti-2,5 Si-5 Zr проводили в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе диаметром 128 мм.

Полученные результаты свидетельствуют о потенциальной возможности использования каждого из опробованных способов для получения литых заготовок из сплавов систем Ti-Si и Ti-Si-Zr. Вместе с тем, при получении экспериментальных сплавов

Таблица 5

**Химический состав слитков, выплавленных на универсальном плазменно-дуговом агрегате**

Сплав системы	Среднее содержание составляющих, % (мас.)				
	Al	Si	Zr	C	O <sub>2</sub>
Ti-Si	–	0,10	–	0,18	0,021
Ti-1 Si	–	1,18	–	0,20	0,018
Ti-2 Si	–	2,10	–	0,21	0,019
Ti-4 Si	–	3,60	–	0,18	0,021
Ti-6 Si	–	5,70	–	0,22	0,023

Примечание: Ti – основа. Общее содержание Fe и Cr (%мас.) было около 0,2, содержание N – меньше 0,006, N – меньше 0,003 для всех сплавов

**Содержание примесей губчатого титана ТГ 110М**

Номер партии	Содержание примесей, мас. %							
	Fe	Si	Ni	C	Cl <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Cr
1	0,020	0,002	0,011	0,005	0,047	0,010	0,035	0,024
2	0,020	0,002	0,050	0,005	0,038	0,008	0,037	0,027

Примечание: Ti – основа

плазменно-дуговым методом с использованием графитового гарнисажного тигля содержание углерода возрастает до 0,2-0,25 %мас., что отрицательно сказывается на их пластичности.

При вакуумно-дуговой выплавке с расходуемым электродом возникают проблемы с обеспечением однородности химического состава слитков по их объему. Этих недостатков практически лишена электронно-лучевая литейная технология, которая, кроме всего, дает возможность использования шихты разного вида без специальной их подготовки. Исходя из этого, для получения образцов опытных сплавов с целью изучения комплекса физико-механических характеристик в дальнейшем используем именно этот метод. Составы сплавов выбирали на основании анализа лабораторных образцов с точки зрения перспективы их использования в качестве жаропрочных и жаростойких материалов. Состав и свойства сплавов электронно-лучевой плавки в литом состоянии представлены в табл. 7. Как видно из таблицы, наиболее высокой жаростойкостью при температурах выше 900° обладает сплав ЛМ-116. В то же время, сплав ЛМ-18 имеет более высокую прочность как при комнатной, так и повышенной температурах, а сплав ЛМ-102 более трещиностойчив при комнатной температуре.

Таким образом, выбор одного из этих сплавов должен осуществляться исходя из технических требований для конкретных условий эксплуатации. Целесообразно также продолжить поиски по оптимизации химического состава с привлечением других легирующих элементов.

**Выводы**

Электронно-лучевая гарнисажная, плазменно-дуговая и вакуумно-дуговая плавки обеспечивают получение сплавов с заданным составом.

При получении экспериментальных сплавов плазменно-дуговым методом с использованием графитового гарнисажного тигля содержание углерода возрастает до 0,2-0,25 %мас., что отрицательно отражается на их пластичности.

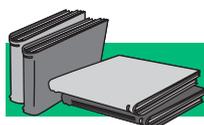
При вакуумно-дуговой выплавке с расходуемым электродом возникают проблемы, связанные с обеспечением однородности химического состава слитков по их объему.

Полученные результаты свидетельствуют о потенциальной возможности использования каждого из выбранных способов для получения литых заготовок из сплавов систем Ti-Si и Ti-Si-Zr. Выбор одного из них обуславливается конкретными

Таблица 6 обстоятельствами: массой необходимой для дальнейшей переработки заготовки, наличием шихтовых материалов, необходимым уровнем физико-механических характеристик, стоимостью конечной продукции и т. п.

## Физико-механические свойства сплавов системы Ti-Si-Al электронно-лучевой плавки в литом состоянии

Плавка	Сплав	Температура испытаний, °С	Свойства					
			Плотность, г/см <sup>3</sup>	Твердость НРС	Предел плотности при растяжении, МПа	Вязкость разрушения, МПа·м <sup>1/2</sup>	Коэффициент термического расширения, 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	Средняя скорость окисления, мг/см <sup>2</sup> ·ч
ЛН18	Ti-6,2Si-5,7 Al	20	4,44	45	638-673	14,5-17,0	8,4-8,7	–
		600	–	–	550-610	15,4-17,1	9,3-9,7	–
		700	–	–	490-530	18,2-20,9	9,7-10,0	0,05-0,06
		800	–	–	290-330	–	9,8-10,2	0,06-0,07
		900	–	–	–	13,6-15,1	9,9-10,3	0,25-0,97
ЛН116	Ti-5,7Si-5,4Al-5,5 Zr	20	4,46	44	550-566	16,9-18,2	8,6-8,7	–
		600	–	–	503-510	19,0	9,6-9,7	–
		700	–	–	485-490	14,5-16,0	9,8-9,9	0,04-0,05
		800	–	–	285-300	11,2-13,1	10,0-10,1	0,06-0,07
		900	–	–	–	9,1-10,8	10,2-10,3	0,11-0,19
ЛН102	Ti-2,0Si-5,4Al-5,3 Zr	20	4,47	43	563-571	18,2-21,5	8,5-8,6	–
		600	–	–	572-580	14,2-15,8	9,6-9,7	–
		700	–	–	383-390	16,0-21,0	9,8-9,9	0,05-0,06
		800	–	–	180-195	14,2-17,8	10,0-10,4	0,06-0,07
		900	–	–	–	9,5-15,0	10,3-10,9	0,20-0,54



## ЛИТЕРАТУРА

1. Borrero J. R., Cure J., Fabre N. J., Rosado E. Mechanics of prosthetic heart valves. In Applications of Engineering Mechanics in Medicine, GED – University of Puerto Rico, Mayaguez. – 2003. – P. 1-17.
2. Minkler, Ward W. Titanium's 37 Year7 // J. Metals. – 1987. – № 3. – P. 9.
3. Boyer, Rodney R. Aerospace applications of beta titanium // Id. – 1994. – № 7. – P. 20-23.
4. Ульянов В. Л. Электронно-лучевая гарнисажная плавка при получении фасонных отливок // Литейн. пр-во. – 1972. – № 10. – С. 13-15.
5. Левицкий Н. И., Аникин Ю. Ф., Лапшук Т. В. Факторы качества литых титановых сплавов и отливок при электронно-лучевой плавке // Процессы литья. – 2002. – № 7. – С. 65-70.

## Анотація

Кузьменко М. М., Кулак Л. Д., Левицкий М. І., Мірошниченко В. І.  
Способи виплавки сплавів систем Ti-Si та Ti-Si-X

Наведено технічні характеристики електронно-променевої гарнісажної установки, універсального плазмово-дугового агрегату та експериментальної вакуумно-дугової печі, які використовують для виплавки серійних титанових сплавів. Проведені дослідні плавки показали, що вибір плавильного агрегату для одержання якісних литих заготовок із сплавів систем Ti-Si та Ti-Si-X обумовлено масою, конфігурацією необхідних заготовок, наявністю шихтових матеріалів, вартістю кінцевої продукції тощо.

## Ключові слова

електронно-променева установка, плазмово-дуговий агрегат, вакуумно-дугова піч, сплави систем Ti-Si та Ti-Si-X

Technical descriptions of the electron-beam skull furnace, universal plasma-arc aggregate and experimental vacuum-arc furnace, which are used for the serial titanium alloys melting, are presented. The experiments of alloys getting showed, that the choice of melting aggregate for high-quality billets production is conditioned by weight, billets configuration, charge and cost of final output etc.

УДК 669.054.8

**В. М. Соколов**, **Е. А. Жидков**, **В. Д. Бабюк**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## Прямое использование биоотходов в качестве топлива в пирометаллургии\*

Проанализирован опыт украинских и российских металлургов по применению некоторых видов биоотходов в производстве ферросплавов и сталеварении. Показано, что использование отходов лесного хозяйства является весьма эффективным при производстве высокочистых материалов, таких как ферросилиций с низким содержанием фосфора и металлургический кремний. При этом возрастают выход кремния и производительность процесса. Потребление коксового орешка и полукокса снижается. Показательным примером использования отходов сельского хозяйства является применение рисовой шелухи в сталеварении. Шелуха используется в качестве изоляционного материала для расплавленного металла в ковшах.

**Ключевые слова:** ферросплав, сталеварение, теплотворная способность, примесь, изолятор

### Введение

Использование биоотходов [1, 2] (табл. 1) может сэкономить 5,78 млн. т угля, что составляет около 10 % угля, добываемого в Украине. Таким образом, оптимальное использование биоотходов в качестве топлива существенно снизит долю Украины в выбросах CO<sub>2</sub>.

Однако широкое использование биоотходов в Украине в настоящий момент невозможно по ряду причин. Основная проблема здесь связана с ограниченным количеством имеющихся котлов и печей, в которых биотходы могут быть использованы в каче-

стве топлива. В то же время в Украине имеется хорошо развитое пирометаллургическое производство и определенный опыт в замене ископаемого топлива некоторыми видами твердого биотоплива.

Практика выявила несколько позитивных факторов, которые могут способствовать использованию биотоплива в пирометаллургии в Украине. Таковыми являются следующие:

– Наличие оборудования, работающего при повышенных температурах. Это снизит стоимость внедрения новых типов топлива.

– Твердые ископаемые виды топлива, в большинстве своем, содержат примеси, которые нежелательны для производства чистых металлов и сплавов. Очень часто твердое биотопливо не содержит такие примеси, это особенно характерно для отходов лесного хозяйства. Обычно при выращивании леса не применяются никакие неорганические удобрения, в том числе фосфатные. Поэтому отходы лесного хозяйства не содержат некоторые органические вещества и, прежде всего, фосфор.

Таблица 1

**Потенциал Украины по отходам основных сельскохозяйственных зерновых культур и лесного хозяйства.**

Вид отходов	Годовое количество образующихся отходов, млн. т	Теплотворная способность, кДж/кг	Потенциал для замены угля биоотходами, млн. т
Солома зерновых культур	6,17	10500	2,21
Стебли кукурузы	2,79	12500	1,19
Шелуха подсолнечника	0,66	16000	0,36
Отходы лесоповала и деревообрабатывающей промышленности	4,29	13800	2,02

\*Авторы выражают признательность УНТЦ и НАН Украины за финансовую поддержку в рамках проекта № 4921 в проведении настоящих исследований