



УДК 669.187.526

## СПОСОБ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ НИЗКОЛЕГИРОВАННОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА GRADE 12

**А. Л. Пузрин, А. Ю. Северин**

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.  
03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11, E-mail: office@paton.kiev.ua

В настоящее время одним из основных способов производства титановых сплавов является вакуумно-дуговой переплав (ВДП). Однако процесс изготовления расходных электродов требует наличия мощных прессов и оборудования. При ВДП для получения качественных слитков применяют два, а при использовании тугоплавких легирующих компонентов — не менее трех переплавов, что значительно повышает стоимость слитков. В значительной мере недостаток ВДП лишен способ электронно-лучевой переплава, имеющий независимые источники нагрева и с помощью которого можно переплавлять некомпактное сырье. При ЭЛП имеются и проблемы, связанные с получением легированных титановых сплавов — для минимизации потерь легирующих компонентов сплава ограничивают время пребывания металла в расплавленном состоянии, однако появляются сложности с растворением тугоплавких элементов в титане. Предложено использовать готовые лигатуры заданного химического состава и с температурой плавления ниже температуры плавления выплавляемого сплава, что позволяет предотвратить чрезмерное испарение легирующих компонентов сплава и обеспечить полное растворение тугоплавких компонентов сплава. Проведены экспериментальные плавки с использованием в качестве лигатуры сплава Hastelloy B-2, получены слитки диаметром 75 мм и длиной 520...680 мм. Показано, что плавка сплава Grade 12 с использованием готовой лигатуры увеличивает скорость плавки до 40 % и позволяет получать качественный слиток за один переплав. Библиогр. 7, табл. 1, илл. 1.

**Ключевые слова:** ВДП; титановый сплав; слиток; частицы тугоплавкого металла; легирование; ЭЛП; промежуточная емкость; химический состав; шихта; лигатура; скорость плавки

Одним из основных способов производства титановых сплавов является вакуумно-дуговой переплав (ВДП) [1–2]. Однако он характеризуется существенными недостатками. Для изготовления расходных электродов требуется наличие дорогих мощных прессов и оборудования для подготовки сырья. Кроме того, при ВДП электрические параметры процесса жестко связаны с устойчивостью горения дуги и, соответственно, с количеством расплавляемого в единицу времени металла.

Поскольку при этом необходимо обеспечить удовлетворительное формирование слитка, возможности для регулирования скорости переплава крайне ограничены. Поэтому при ВДП время пребывания металла в жидкой ванне невелико и его не удается увеличить без ущерба для качества формирования слитка.

Это приводит к тому, что при ВДП титановых сплавов, легированных тугоплавкими компонентами, частицы тугоплавкого металла не успевают полностью раствориться в объеме жидкой ванны и вплавляются в уже затвердевающий металл на дне ванны. Поэтому, как правило, применяют два, а при использовании тугоплавких

легирующих компонентов — не менее трех переплавов [3], что значительно повышает трудоемкость и стоимость слитков титановых сплавов. Эти недостатки ВДП в полной мере проявляются при выплавке низколегированного титанового сплава Grade 12, в состав которого входят молибден ( $T_{пл} = 2623 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 10,22 \text{ г/см}^3$ ) и никель ( $T_{пл} = 1455 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 8,9 \text{ г/см}^3$ ). Коррозионноустойчивый сплав Grade 12 хорошо поддается горячей и холодной деформации, отлично сваривается и имеет высокую прочность при повышенных температурах. Он широко используется в химической промышленности и применяется в изготовлении бесшовных труб для конденсаторов и теплообменников, сосудов высокого давления, фитингов и т. д. Сплав Grade 12 имеет следующий состав, мас. %: 0,2...0,4 Mo; 0,6...0,9 Ni; 0,3 Fe; 0,25O (max), 0,03N (max), 0,08 C (max).

В значительной степени недостаток ВДП лишен способ электронно-лучевой переплава (ЭЛП) [4], с помощью которого можно переплавлять как компактное исходное сырье, так и некомпактное, например губку и скрап. Кроме того, электронно-лучевой нагрев не зави-



Химический состав слитков сплава Grade 12, полученных с использованием чистых легирующих компонентов шихты при высокой и низкой скоростях плавки, а также с использованием лигатуры, мас. %

Место отбора проб	Ni	Mo	Fe
<i>Высокая скорость</i>			
Верх	0,57	0,34	0,16
Середина	0,82	0,18	0,16
Низ	0,78	0,21	0,18
<i>Низкая скорость</i>			
Верх	0,85	0,57	0,17
Середина	0,93	0,53	0,16
Низ	0,87	0,36	0,14
<i>С использованием лигатуры</i>			
Верх	0,65	0,27	0,23
Середина	0,61	0,23	0,21
Низ	0,68	0,26	0,24

Примечание. Титан — остальное.



Внешний вид слитка сплава Grade 12, полученного с использованием лигатуры

вых материалов. Изначально выплавляли серию слитков сплава Grade 12 с использованием легирующих компонентов, никеля и молибдена в чистом виде (никель в виде пластин, молибден — кусочков). Выполнена экспериментальная плавка с использованием в качестве лигатуры известного сплава Hastelloy B-2 (ASTM B335) в виде прутков.

Этот сплав на никелевой основе используется для изготовления труб конденсаторов и теплообменников и является стойким против воздействия кислот при любых температурах. Химический состав сплава Hastelloy B-2 следующий мас. %: 28 Mo, 1 Cr (max), 1 Fe (max), 1 Co (max), остальное никель (примерно 69 %).

Состав этого сплава полностью подходит для получения низколегированного сплава Grade 12, имеющего следующий состав, мас. %: 0,2...0,4 Mo; 0,6...0,9 Ni; 0,3 Fe. Плотность сплава Hastelloy B-2 составляет 9,22 г/см<sup>3</sup>, температура плавления — 1370 °С, что ниже температуры плавления титана.

Экспериментальный слиток выплавляли способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью на лабораторной электронно-лучевой печи УЭ-208. Шихтовку осуществляли на базе предшествующего опыта получения титановых сплавов. Использовали листы технического титана BT1-0 и прутки сплава Hastelloy, которые равномерно укладывали по всей длине короба.

Выплавляли экспериментальные слитки диаметром 75 мм и длиной от 520 до 680 мм. От слитков отобраны пробы для химического анализа. В слитках, выплавленных по схеме с использованием чистых легирующих компонентов на высоких скоростях плавки, иногда встречались места с пониженным содержанием молибдена, что свидетельствует о его неполном растворении в промежуточной емкости (таблица). При снижении скорости плавки, отмечено достаточно равномерное распределение молибдена и никеля по длине слитка, однако увеличилось их общее содержание в сплаве, что связано с более интенсивным испарением титана (таблица). Все это требовало повторного переплава слитков для усреднения химсостава. Результаты химического анализа слитка, полученного с использованием лигатуры, и его внешний вид показаны в таблице и на рис. 1.

После выполнения серии плавки по результатам записей в журнале проведен анализ технологических параметров и сделан вывод о том, что при плавке сплава Grade 12 с использованием готовой лигатуры в качестве шихтовых материалов скорость плавки повысилась на 40 %. Это связано с меньшей температурой плавления лигатуры, чем у чистого молибдена, и отсутствием необходимости выдержки металла в промежуточной емкости до полного растворения молибдена и никеля.

сит от скорости подачи переплавляемого металла, что позволяет увеличивать при выплавке сплавов длительность пребывания металла в расплавленном состоянии без ущерба для качества формирования слитка [5].

При всех достоинствах ЭЛП существуют проблемы получения титановых сплавов, легированных тугоплавкими компонентами [6], что связано с двумя факторами. Во-первых, чтобы не допускать чрезмерного испарения всех компонентов сплава при ЭЛП ограничивают время пребывания металла в расплавленном состоянии и его температуру. Во-вторых, при использовании в шихте чистых металлических компонентов, особенно тугоплавких, возникают сложности с растворением некоторых из них в титане. Например, при выплавке титанового сплава Grade 12 находящийся в шихте тугоплавкий и тяжелый молибден не плавится сразу под действием электронного луча, а повав в промежуточную емкость, опускается на дно жидкой ванны и в дальнейшем растворяется довольно медленно. Для его полного растворения требуется значительный перегрев расплава, что усиливает испарение всех компонентов сплава и приводит к недостаточной равномерности химического состава слитка.

Для полного расплавления и равномерного распределения легирующих компонентов, а также выплавки низколегированных сплавов титана предложено использовать лигатуры с температурой плавления ниже солидуса выплавляемого сплава. Желательно, чтобы плотность этих лигатур была выше плотности титана, что позволит избавиться от непосредственного воздействия на них электронного луча и предотвратить чрезмерное испарение легирующих компонентов сплава.

Задача данной работы заключалась в разработке способа получения качественных слитков сплава Grade 12 с использованием готовой лигатуры в качестве шихто-



1. Плавка и литье титановых сплавов / А. Л. Андреев, Н. Ф. Аношкин, К. М. Борцезовская и др. — М.: Металлургия, 1978. — 383 с.
2. Латаш Ю. В., Матях В. Н. Современные способы производства слитков особо высокого качества. — Киев: Наук. думка, 1987. — 336 с.
3. Резниченко Е. А. Подготовка шихты для выплавки однородных титановых сплавов // Технология металлов. — 2000. — № 6. — С. 2–10.
4. Мовчан Б. А., Тихоновский А. Л., Курапов Ю. А. Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов. — Киев: Наук. думка, 1972. — 240 с.
5. Электронно-лучевая плавка титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. — Киев: Наук. думка, 2006. — 247 с.
6. Dimiduk D. M., McQuay P. A., Kim Y.-W. Gamma alloy technology 1999 // Titanium'99. Sci. and Technology: Proc. 9th World conf. on Titanium (Saint-Petersburg, Russia, 7–11 June, 1999). — Saint-Petersburg, 1999. — Vol. 1. — P. 259–267.

At present, one of the main methods of production of titanium alloys is the vacuum-arc remelting. However, the process of manufacture of consumable electrodes requires the presence of powerful presses and equipment. To produce the quality ingots in VAR, two or, when using refractory alloying elements, not less than three remeltings are used, that significantly increases the cost of ingots. The method of electron beam remelting, having independent heat sources and can be used in remelting of non-compact raw materials, has no drawbacks of VAR. The problems are existing also in EBR, connected with producing of alloyed titanium alloys, as to minimize the losses of alloying components of alloy the time of metal duration in molten state is limited, however, the difficulties are appeared in dissolution of refractory elements in titanium. It was offered to apply the ready master alloys of preset chemical composition and temperature of melting below the temperature of melting of alloy being melted, thus allowing prevention of excessive evaporation of alloying components of the alloy and providing the complete dissolution of alloy components. Experimental meltings were performed by using alloy Hastelloy B-2 as a master alloy. The ingots of 75 mm diameter and 520-680 mm length were produced. It was shown that melting of alloy Grade 12 with use of ready master alloy increases the melting speed up to 40% and allows producing the quality ingot per one remelting. Ref. 7, Table 1, Fig. 1.

**Key words:** VAR; titanium alloy; ingot; particles of refractory metal; alloying; EBR; intermediate crucible; chemical composition; charge; master alloy; melting speed

Поступила 04.02.2013

## НОВАЯ КНИГА

### ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА БУРОВЫХ ДОЛОТ /

*О. К. Назаренко, В. М. Нестеренков, А. А. Бондарев и др. —*

Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2012. — 116 с.



Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований свариваемости высокопрочных среднелегированных сталей 14ХНЗА, 40ХН и 14ХНЗМА, из которых традиционно изготавливаются буровые долота, а также анализа влияния основных параметров режима ЭЛС, технологических приемов, развертки пучка и модифицирующих вставок, применяемых для управления структурообразованием, предупреждения кристаллизационного растрескивания и повышения прочностных характеристик сварных соединений. В соответствии с полученными результатами и современными требованиями в ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ выполнены проектно-конструкторские разработки и изготовлена установка для ЭЛС одновременно трех стыковых соединений тремя пушками, что значительно повышает производительность и экономическую эффективность промышленного производства буровых долот. Приведены технические характеристики разработанного оборудования и описаны компьютерные технологические программы ЭЛС с применением модификаторов металла шва. Книга предназначена для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий и институтов, специализирующихся в области высоких технологий и современного сварочного оборудования.

Заказы на книгу просьба направлять  
в редакцию «Современная электрометаллургия»  
Тел./факс: (38044) 200-82-77; 200-54-84  
E-mail: journal@paton.kiev.ua