



УДК 669.187.526:51.001.57

## ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ УСТАНОВКА УЭ-5812

Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, В. Д. Корнейчук,  
Ю. Т. Ищук, А. Ю. Северин, С. В. Давыдов

Изложены конструктивные особенности и технические характеристики новой промышленной электронно-лучевой установки УЭ-5812. Обоснована необходимость широкого внедрения установок этого класса в металлургию титана. Показана экономическая эффективность данной установки за счет технических и технологических преимуществ, в частности возможности плавки недробленых блоков губчатого титана.

Design features and technical characteristics of the new industrial electron beam installation UE-5812 are described. The need in wide implementation of installations of this class in titanium metallurgy was grounded. The economical efficiency of this installation owing to technical and technological advantages, in particular the feasibility of melting uncrushed blocks of spongy titanium, is shown.

**Ключевые слова:** электронно-лучевой переплав; установка; промежуточная емкость; аксиальная пушка; плавка металлов и сплавов

Электронно-лучевая плавка (ЭЛП) [1] благодаря наличию независимого концентрированного источника нагрева — электронного луча — значительно расширяет технологические возможности процесса. В ближайшие 10–15 лет она может составить серьезную конкуренцию вакуумно-дуговой плавке (ВДП) [2] в области производства слитков титановых сплавов благодаря таким более высоким технологическим возможностям и качеству металла, как расширение номенклатуры переплавляемой шихты (лом, непрессованная губка, блоки губчатого титана) [3] (рис.1); разделение процессов плавки металла, его рафинирования (в том числе от включений высокой и низкой плотности) и кристаллизации слитка в пространстве и во времени путем использования промежуточной емкости [1]; возможность производства слитков не только круглого, но и прямоугольного сечения, используемых в качестве ленточной литой заготовки для изготовления листового проката [4]; полное удаление неметаллических включений высокой плотности, а также значительное измельчение и удаление включений низкой плотности в промежуточной емкости, повышение за счет этого качества металла слитков [5]; увеличение выхода годного металла за счет сокращения количества переплавов (1 вместо 2–3) и оплавление поверхностного слоя слитков вместо механической обработки поверхности (повышение выхода годного на 10... 15 %) [6].

В настоящее время разработаны новейшие технологии выплавки слитков различных металлов и сплавов способом ЭЛПЕ [1, 4]. Для достижения максимального эффекта от реализации данных технологий необходимы новые высокопроизводительные установки промышленного типа. При создании новой установки УЭ-5812 (рис. 2) использовали



Рис. 1. Выплавка слитка из брикетов губчатого титана

© Н. П. ТРИГУБ, Г. В. ЖУК, В. Д. КОРНЕЙЧУК, Ю. Т. ИЩУК, А. Ю. СЕВЕРИН, С. В. ДАВЫДОВ, 2007



Рис. 2. Внешний вид электронно-лучевой установки УЭ-5812

опыт проектирования и эксплуатации электронно-лучевых установок УЭ-185М [1] и УЭ-121 [7].

Конструкция УЭ-5812 отличается от ранее разработанных и эксплуатируемых в промышленности Украины установок в основном тем, что штоковые механизмы подачи сырья на плавку и вытягивания слитка заменены цепными. Это позволило увеличить массу выплавляемых слитков в 2 раза. Кроме того, установка характеризуется высокой технологичностью при выполнении различных процессов плавки, достигаемой путем несложной замены одной оснастки другой, что позволяет изготавливать слитки круглого сечения от 100 до 600 мм, слитки прямоугольного сечения размером от 80×400 до 200×1250 мм и длиной до 4 м.

Конструктивно электронно-лучевая установка УЭ-5812 состоит из плавильной камеры (камеры плавки), а также камер загрузки и слитка. Все элементы конструкции выполнены с полыми стенками, в которых циркулирует вода для принудительного охлаждения в процессе плавки и остывания слитка. В плавильной камере расположены и пристыкованы к ней технологическая оснастка, механизмы подачи и вытягивания слитка. Установка оснащена электронно-лучевыми пушками, источниками электропитания, системами управления и стабилизации тока луча, а также вакуумной системой.

**Технические характеристики  
электронно-лучевой установки УЭ-5812**

Установленная мощность, кВт	1500
Ускоряющее напряжение, кВ	30
Количество пушек, шт.	5
Наибольшие размеры заготовки, м:	
длина	5,3
сечение	0,55×0,80
Наибольшие размеры слитков, м:	
длина	4
диаметр	0,6
для прямоугольного сечения	1,1×0,3
Габариты установки, м	14×8×5

Плавильная камера является центральной частью установки, в которой реализуется процесс плавки. Она представляет собой вертикально расположенный цилиндр, сверху ограниченный вакуумно-плотной крышкой с установленными на ней

электронно-лучевыми пушками (5 шт.), а снизу имеющий технологическое отверстие для подсоединения камеры слитка. Внутри камеры находится технологическая оснастка, состоящая из кристаллизатора и промежуточной емкости.

Для подъема и смещения верхней крышки с электронно-лучевыми пушками за пределы плавильной камеры используется система перемещения. Удобство данной системы заключается в упрощении извлечения готового слитка с помощью цехового крана и чистке внутренних поверхностей от возгонов вне камеры плавки.

Через имеющиеся на нижней крышке штуцеры охлаждающая вода подается в кристаллизатор с помощью системы труб, а на промежуточную емкость — со стороны камеры загрузки. На боковой стенке камеры установлена смотровая система оператора стробоскопического типа, а также патрубки для установки высоковакуумных ламп.

Слева от оператора в стенке камеры размещены патрубки диаметром 630 мм, через которые с помощью вакуумных затворов камера плавки соединяется с откачной системой. Справа от оператора на боковой стенке камеры находится вакуумно-плотная технологическая дверь с расположенной на ней смотровой системой, используемой технологом для наблюдения за процессом плавки. Напротив оператора камера плавки соединяется с камерой загрузки.

Камера загрузки представляет собой полый цилиндр с рубашкой охлаждения. На боковой стороне цилиндра расположена вакуумно-плотная технологическая дверь, используемая для удобства проведения различных технологических операций при обслуживании установки.

При загрузке шихты указанные части камеры расстыковываются после освобождения зажимов, расположенных по периметру уплотнения, затем задняя отделяемая часть камеры загрузки отъезжает с помощью электропривода.

В камере загрузки размещен механизм подачи шихты (пара параллельных направляющих, вдоль которых с помощью цепной передачи перемещается толкатель), отъезжающий вместе с отделяемой частью. Механизм подачи позволяет подавать цельную заготовку, расходуемый короб с шихтовыми материалами, кусковую шихту, насыпные материалы (например, губчатый титан), а также недробленые блоки губчатого титана массой до 1 т.

В двух первых случаях на направляющих устанавливаются рольганг, по которому толкатель подает заготовку в зону плавки. При отдельной шихте на направляющие устанавливаются нерасходуемый короб шириной, не превышающей ширину задней стенки промежуточной емкости, и толкатель равномерно сталкивает шихтовые материалы в промежуточную емкость. Возможность расстыковки камеры загрузки позволяет оперативно загружать шихту с помощью цехового крана.

Камера слитка представляет собой водоохлаждаемый цилиндр, крепящийся к нижней крышке ка-



меры плавки через фланец. Основой для наплавления слитка является медный водоохлаждаемый поддон, перемещающийся относительно камеры слитка с помощью траверсы, приводимой в движение цепным механизмом. На поддоне перед началом плавки крепят «закладные», изготовленные из материала выплавляемого слитка.

В нижней части камеры слитка расположен технологический люк, посредством которого обеспечивается доступ к внутренним частям механизма вытягивания. Через указанный технологический люк производят установку «закладных» перед плавкой и освобождение готового слитка из закрепления после плавки перед его извлечением из установки.

Технологическая оснастка состоит из промежуточной емкости и кристаллизатора [1, 5]. Первая представляет собой медную водоохлаждаемую поверхность, ограниченную стенками, в одной из которых выполнен проем для слива жидкого металла. В нее электронными лучами сплавляется шихта, подаваемая из камеры загрузки. Промежуточная емкость служит для усреднения химического состава, рафинирования расплава от примесей и включений [1].

В процессе плавки на дне промежуточной емкости образуется гарнисаж, предохраняющий ее стенки и дно от взаимодействия с расплавленным металлом, который из промежуточной емкости сливается в кристаллизатор (полый замкнутый водоохлаждаемый контур, внутренняя часть которого, контактирующая с металлом слитка, выполнена из меди). Кристаллизатор и промежуточная емкость закреплены на раме камеры загрузки и при откате камеры перемещаются вместе с ней, что позволяет оперативно обслуживать все узлы. Охлаждение оснастки осуществляется охлаждающей жидкостью, подаваемой по системе труб.

Установка УЭ-5812 оснащена электронными пушками аксиального типа «Патон-300» (рис. 3), размещенными на верхней крышке камеры плавки [1]. Каждая пушка состоит из катодного узла с вольфрамовым электродом, установленным на высоковольтном изоляторе анодного водоохлаждаемого узла, магнитной линзы, отклоняющей системы, лучевода и оснащена индивидуальной системой откачки, позволяющей стабилизировать работу пушки в условиях интенсивного газовыделения в процессе плавки первичных шихтовых материалов.

#### Технические характеристики пушки «Патон-300»

Номинальная мощность, кВт .....	300
Максимальная частота развертки, Гц .....	1000
Максимальный ток, А .....	15
Угол отклонения пучка от оси пушки, град .....	0... 35

Конструктивное расположение электронных пушек над зоной плавки, возможность оперативно изменять как установленные зоны нагрева, так и вкладываемую в них тепловую мощность позволяют активно влиять на процесс электронно-лучевой плавки.

Электропитание пушек осуществляется с помощью высоковольтных источников постоянного



Рис. 3. Электронные пушки «Патон-300»

напряжения 30 кВ, состоящих из коммутационной пускозащитной аппаратуры, тиристорных ключей, дросселей, трансформаторов, выпрямителей и источников накала катодов пушек. Каждая пушка оснащена собственным источником напряжения, что позволяет повысить надежность работы нагревательной системы в целом.

Вакуумная система установки УЭ-5812 включает вакуумные магистрали, затворы и насосы (механические, пароструйные и диффузионные). Магистрали состоят из стальных труб, соединяющих насосы между собой, с камерой плавки, а также с пушками, и обеспечивают необходимые проходные сечения для максимального использования производительности насосов. Вакуумирование внутренних полостей камер установки с уровня атмосферного давления осуществляется механическим насосом РВН-6. Для вакуумирования установки и удаления газов и паров металла в процессе плавки используют следующие вакуумные насосы: НВЗ-300 (2 шт.); 2ДВН1500 (2 шт.); пароструйный насос 2НВБМ630 (2 шт.); диффузионный насос Н-160/700 (5 шт.).

Вакуумная система установки УЭ-5812 позволяет создавать разрежение в объеме плавильной камеры ( $1 \cdot 10^{-2}$  Па) и в пушках ( $1 \cdot 10^{-3}$  Па), обеспечивающее бесперебойную работу пушек и необходимую степень рафинирования переплавляемого металла в течение всего технологического процесса.

#### Выводы

1. Показано, что промышленная установка УЭ-5812 является высокопроизводительным агрегатом для плавки металлов и сплавов электронным лучом с промежуточной емкостью. Данная модель отличается от других электронно-лучевых установок более высоким уровнем технических и экономических характеристик. Так, замена штоковых механизмов цепными позволяет при той же производительности вдвое уменьшить габариты камер загрузки шихты и вытягивания слитка, что дает возможность уменьшить необходимое монтажное пространство и вакуумируемый объем.



2. Продemonстрировано, что основным преимуществом установки является возможность переплава недробленых блоков губчатого титана, способствующего исключению трудоемкой операции дробления и сортировки губки, вовлечению в переплав слоев губки низких сортов, что значительно снижает стоимость ЭЛПЕ титановых слитков. Благодаря возможности оперативной замены технологической оснастки можно выплавлять слитки как круглого, так и прямоугольного сечений из сплавов на основе железа, никеля, титана и тугоплавких металлов.

1. *Электронно-лучевая плавка* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 265 с.
2. *Полуфабрикаты из титановых сплавов* / Н. Ф. Аношкин, М. З. Ерманык, Г. Д. Агарков и др. — М.: Металлургия, 1979. — 512 с.
3. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В. Получение титановых слитков из недробленых блоков губчатого титана

способом электронно-лучевой плавки // Титан. — 2005. — № 2. — С. 23–26.

4. Жук Г. В., Березос В. А., Тригуб Н. П. Прогнозирование структуры титановых слитков-слябов, получаемых способом ЭЛПЕ // Современ. электрометаллургия. — 2005. — № 3. — С. 28–31.
5. Ахонин С. В. Математическое моделирование процесса растворения включений TiN в расплаве титана при ЭЛП // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2001. — № 1. — С. 20–24.
6. *Электронно-лучевое оплавление слитков титана* / А. Н. Пикулин, Г. В. Жук, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин // Современ. электрометаллургия. — 2003. — № 4. — С. 17–19.
7. *Электронно-лучевая установка УЭ-121* / Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, П. А. Пап и др. // Там же. — 2003. — № 2. — С. 17–20.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

ЗТМК, Запорожье

Поступила 11.01.2007

УДК 669.187.526.002

## МОРФОЛОГИЯ КАРБИДОВ И МИКРОСТРУКТУРА СТАЛИ Р6М5 ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ПЕРЕПЛАВА

П. А. Шпак, Н. И. Гречанюк, В. А. Осокин, А. А. Артемчук

Приведены результаты исследования структуры, химического и фазового составов быстрорежущей стали Р6М5, полученной способом электронно-лучевого переплава, в структуре которой образуется эвтектика двух морфологических типов: преобладающая пластинчатая (на основе метастабильного карбида  $M_2C$ ) и скелетная (на основе  $M_6C$ ). Отмечены уменьшение химической неоднородности, высокие дисперсность и равномерность распределения карбидной фазы в слитках ЭЛП.

Results are given of investigation of structure, chemical and phase composition of high-speed steel R6M5, produced by electron beam remelting method, in the structure of which the eutectic of two morphological types is formed: dominating lamellar type (on base of metastable carbide  $M_2C$ ) and skeleton type (on base of  $M_6C$ ). The decrease in chemical heterogeneity, high dispersity and uniformity of distribution of carbide phase in ESR ingots was outlined.

**Ключевые слова:** электронно-лучевой переплав; быстрорежущая сталь; слиток; микроструктура; зерно; карбиды; эвтектика; термическая обработка; теплоустойкость

**Введение.** Ускоренное управляемое охлаждение при кристаллизации слитков быстрорежущей стали, получаемых способами специальной электрометаллургии, в частности электронно-лучевым переплавом в промежуточной емкости (ЭЛПЕ), вызывает фазовые и структурные изменения, что существенно влияет на свойства металла слитков. Это открывает широкие возможности для получения ка-

чественных слитков с заданным комплексом механических и эксплуатационных свойств путем варьирования контролируемых параметров технологического процесса переплава и последующей обработки [1–4].

Данные об управлении структурообразованием слитков быстрорежущей стали при ЭЛПЕ в литературе практически отсутствуют. В связи с этим в настоящей работе исследованы особенности структурообразования, морфология эвтектики, фазовый и химический составы быстрорежущей стали Р6М5 электронно-лучевого переплава.