

# ОСОБЕННОСТИ ВЫПЛАВКИ СЛИТКОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT19 В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ УСТАНОВКЕ С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЕМКОСТЬЮ

С. В. Ахонин<sup>1</sup>, А. Ю. Северин<sup>1</sup>, В. А. Березос<sup>1</sup>,  
А. Н. Пикулин<sup>1</sup>, А. Г. Ерохин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.  
03680, Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.  
03028, г. Киев, ул. Ракетная, 26. E-mail: titan.paton@gmail.com

С помощью методов математического моделирования оценивали влияние технологических параметров электронно-лучевой плавки на содержание легирующих элементов в слитке титанового сплава VT19, а также адекватность построенной математической модели для многокомпонентных титановых сплавов. На основании расчетов определены оптимальные технологические режимы ведения электронно-лучевой плавки и проведена серия экспериментальных плавок слитков сплава VT19 диаметром 110 мм. По результатам работы выявлены особенности электронно-лучевой плавки высокопрочного титанового сплава VT19, которые необходимо учитывать при подготовке и выплавке данного сплава. Анализ результатов экспериментальных данных показал, что математическая модель описывает процесс испарения легирующих элементов из титанового сплава VT19 при электронно-лучевой плавке с достаточно высокой степенью точности и может быть использована для получения слитков с заданным химическим составом. Библиогр. 8, табл. 1, ил. 5.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая плавка; титановый сплав; испарение; математическое моделирование

Важнейшими элементами конструкций авиационной и космической техники являются детали и узлы, изготовленные из высокопрочных титановых сплавов. По уровню прочности титановые сплавы принято разделять на: малопрочные (временное сопротивление разрыву менее 650 МПа); средней прочности (700...1000 МПа) и высокопрочные (более 1000 МПа) [1]. К высокопрочным титановым сплавам относится сплав VT19 со следующим химическим составом, мас. %: (Ti-(2,5...3,5)Al-(5,0...6,0)Mo-(4,0...5,0)Cr-(3,0...4,0)V-(0,5...1,5)Zr. Содержание примесей должно составлять, не более 0,15 O; 0,05 N; 0,015 H; 0,10 C; 0,15 Si. По сравнению с другими высокопрочными титановыми сплавами, сплав VT19 имеет лучшие значения удельной прочности, плотности и стоимости, так как содержит в своем составе меньше тяжелых и дорогостоящих элементов, а также высокие показатели коррозионной стойкости в атмосферных условиях и морской воде, технологической пластичности в закаленном или отожженном состояниях и после старения (до 1800 МПа) [1, 2]. В промышленности титановый сплав VT19 получают двойным переплавом в вакуумно-дуговых печах с расходуемым электродом. Этот сплав относится к псевдо β-титановым сплавам, которые отличаются высоким содержанием легирующих элементов,

что несколько усложняет его производство способом электронно-лучевой плавки (ЭЛП), так как при выплавке слитков многокомпонентных титановых сплавов возникает проблема обеспечения заданного химического состава слитка. Это вызвано тем, что плавка в электронно-лучевой установке осуществляется в более высоком вакууме, чем в вакуумно-дуговой печи, и легирующие элементы с упругостью пара, превышающей упругость пара титана, испаряются более интенсивно [3, 4]. В данном случае к таким элементам относятся алюминий и хром. Концентрация в слитке элементов с упругостью пара ниже упругости пара титана, в данном случае Mo, V и Zr, может даже несколько повышаться.

Целью работы является оценка с помощью методов математического моделирования влияния технологических параметров ЭЛП на содержание легирующих элементов в слитке титанового сплава VT19, а также проверка адекватности построенной модели для многокомпонентных титановых сплавов.

Известно [3–5], что в процессе ЭЛП с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) испарение алюминия и других компонентов сплава происходит в несколько стадий: с оплаваемого торца расходуемой заготовки; из промежуточной емкости; из

кристаллизатора. При этом время переноса жидкого металла с оплаваемого торца расходоуемой заготовки в промежуточную емкость и из промежуточной емкости в кристаллизатор незначительно и на процессы испарения влияния практически не оказывает. В работе [6] представлена математическая модель процессов испарения легирующих элементов при ЭЛП многокомпонентных титановых сплавов в виде уравнений материального баланса легирующих элементов и титана для каждой зоны, где металл находится в расплавленном состоянии, а связи между зонами представлены в виде массопотоков. Построенные математические модели устанавливают зависимость концентрации алюминия и других компонентов титанового сплава в слитке, полученном способом ЭЛПЕ, от технологических параметров плавки, химического состава исходной шихты и физико-химических констант титанового сплава. Модели позволяют прогнозировать химический состав выплавляемых слитков титановых сплавов и могут быть использованы в производстве для получения слитков с заданным химическим составом.

**Анализ процессов испарения при ЭЛП титанового сплава ВТ19.** Для анализа влияния технологических параметров плавки и химического состава

исходной шихты на химический состав выплавляемых слитков рассмотрен процесс получения слитка титанового сплава ВТ19 способом ЭЛПЕ в кристаллизаторе диаметром 110 мм. Применительно к сплаву ВТ19 математическая модель процессов испарения при ЭЛП имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 m_{j-1}[Al]_{j-1} &= (S_j \rho_{Ti} \beta_j^{Al} + m_j)[Al]_j; \\
 m_{j-1}[Mo]_{j-1} &= (S_j k_j^{Mo} + m_j)[Mo]_j; \\
 m_{j-1}[Cr]_{j-1} &= (S_j k_j^{Cr} + m_j)[Cr]_j; \\
 m_{j-1}[V]_{j-1} &= (S_j k_j^V + m_j)[V]_j; \\
 m_{j-1}[Zr]_{j-1} &= (S_j k_j^{Zr} + m_j)[Zr]_j; \\
 m_{j-1}[Ti]_{j-1} &= (S_j k_j^{Ti} + m_j)[Ti]_j; \\
 m_{j-1} &= m_j + S_j (\rho_{Ti} \beta_j^{Al}[Al]_j + k_j^{Mo}[Mo]_j + \\
 &+ k_j^{Cr}[Cr]_j + k_j^V[V]_j + k_j^{Zr}[Zr]_j + k_j^{Ti}[Ti]_j),
 \end{aligned}$$

где  $j = 1, 2, 3$  — стадии процесса испарения при ЭЛП.

Модель представляет собой систему нелинейных алгебраических уравнений, которую решали численными методами с использованием компьютерной техники.

Для нашего случая коэффициент массопереноса алюминия в расплаве титана в условиях ЭЛП принимаем  $\beta_{Al} = 6,6 \cdot 10^{-6}$  м/с [5]. Численные значения коэффициента активности титана и молибде-

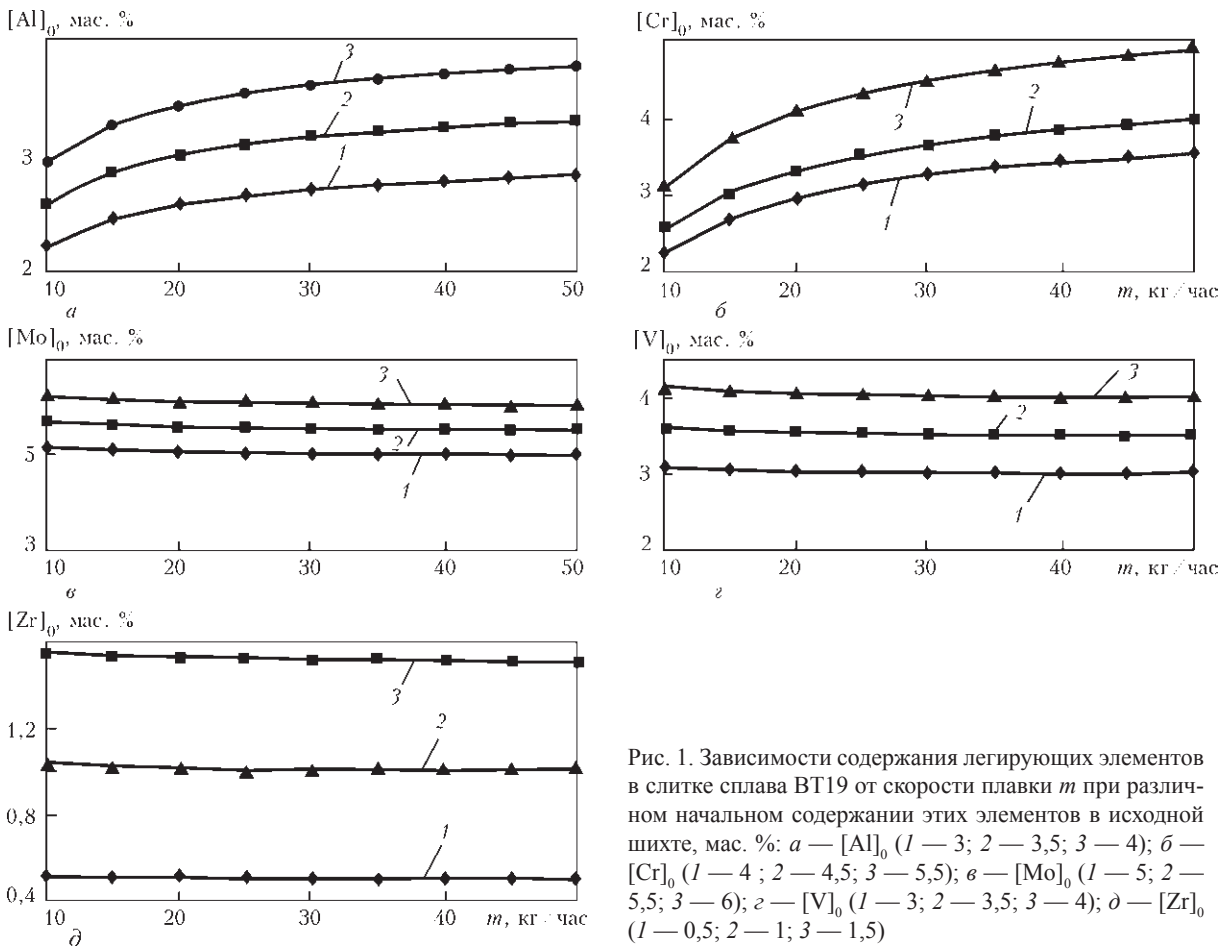


Рис. 1. Зависимости содержания легирующих элементов в слитке сплава ВТ19 от скорости плавки  $m$  при различном начальном содержании этих элементов в исходной шихте, мас. %: а —  $[Al]_0$  (1 — 3; 2 — 3,5; 3 — 4); б —  $[Cr]_0$  (1 — 4; 2 — 4,5; 3 — 5,5); в —  $[Mo]_0$  (1 — 5; 2 — 5,5; 3 — 6); г —  $[V]_0$  (1 — 3; 2 — 3,5; 3 — 4); д —  $[Zr]_0$  (1 — 0,5; 2 — 1; 3 — 1,5)

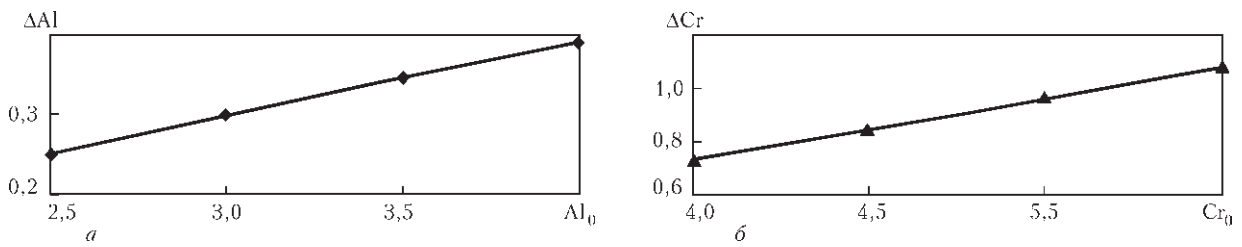


Рис. 2. Зависимости разницы между начальной и конечной концентраций алюминия (а) и хрома (б) в слитке  $\Delta[Al, Cr]$  от исходного их содержания  $[Al, Cr]_0$

на, ванадия и циркония — равными единице, коэффициент активности хрома — 0,8, коэффициент активности алюминия — 0,3 [7].

С помощью математической модели процессов испарения для сплава ВТ19 были определены зависимости содержания легирующих элементов в слитке, промежуточной емкости и торце заготовки от скорости плавки  $m$  при различном химическом составе исходной шихты  $[Al]_0, [Cr]_0, [Mo]_0, [V]_0, [Zr]_0$  (рис. 1, а–д).

Характер полученных зависимостей показывает, что при фиксированном составе исходной шихты увеличение скорости плавки до 30 кг/ч и выше приводит к уменьшению потерь испарением алюминия (рис. 1, а) и хрома (рис. 1, б) и, следовательно, к увеличению их содержания в слитке. При скоростях плавки свыше 30 кг/ч скорости испарения этих элементов минимальны на всех стадиях. Таким образом, для выплавки качественного слитка сплава ВТ19 необходимо обеспечить скорость плавки 30 кг/ч и более для кристаллизатора диаметром 110 мм. Однако увеличение скорости плавки свыше 40 кг/ч может привести к образованию глубокой жидкой ванны в кристаллизаторе, что может негативно сказаться на структуре слитка [8]. Показано, что основным фактором, влияющим на концентрацию алюминия и хрома в слитке, является их исходное содержание в расходуемой заготовке. Чем больше исходное содержание элемента в шихте  $[Al, Cr]_0$ , тем больше разница между его начальным содержанием и его концентрацией в слитке, т. е.  $\Delta[Al, Cr] = [Al, Cr]_0 - [Al, Cr]_{сл}$  (рис. 2). Этот момент также необходимо учитывать при расчете шихтовой заготовки.

Проанализировав процесс испарения легколетучих элементов на каждой из стадий ЭЛП (рис. 3), видно, что максимальное испарение алюминия и хрома происходит в промежуточной емкости (около 50 % от общих потерь испарением). Это в первую очередь связано с максимальной площадью жидкой ванны. Следовательно, данный факт необходимо учитывать при выборе технологической оснастки для выплавки слитков методом ЭЛП.

С помощью математического моделирования проанализировали взаимное влияние исходных

концентраций алюминия и хрома на их конечное содержание в слитке. Выяснили, что изменение начального содержания каждого из этих элементов в исходной шихте никак не сказывается на концентрации другого элемента в слитке (рис. 4, а, б).

По результатам анализа данных расчетов установлено, что концентрация таких элементов сплава ВТ19, как молибден, ванадий и цирконий с увеличением скорости плавки монотонно уменьшается (рис. 1, в–д), что обусловлено более низкой упругостью паров этих элементов по сравнению с остальными компонентами сплава. Следует отметить, что при скоростях плавки свыше 30 кг/ч содержание молибдена, ванадия и циркония в слитке лишь незначительно увеличивается по сравнению с их концентрацией в исходной шихте, что связано с меньшими потерями алюминия, хрома и титана на этих скоростях плавки.

**Проверка адекватности математической модели.**

Для проверки адекватности математической модели и рассчитанных технологических режимов проведена серия плавов слитков титанового сплава ВТ19. Слитки выплавляли в кристаллизаторе диаметром 110 мм на электронно-лучевой установке УЭ-208М. В качестве исходных шихтовых материалов использовали технически чистый

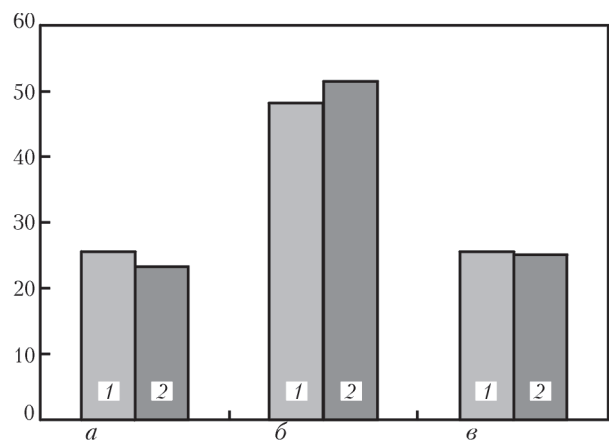


Рис. 3. Относительные потери (отн. %) алюминия и хрома на стадиях ЭЛП сплава ВТ19, где  $\Delta[Al, Cr]$  — общие потери элементов за плавку, а  $\Delta[Al, Cr]_{стaд}$  — потери элементов на каждой из стадий плавки: а — торец заготовки; б — промежуточная емкость; в — кристаллизатор; 1 —  $\Delta Al_{стaд}/Al$ ; 2 —  $\Delta Cr_{стaд}/Cr$

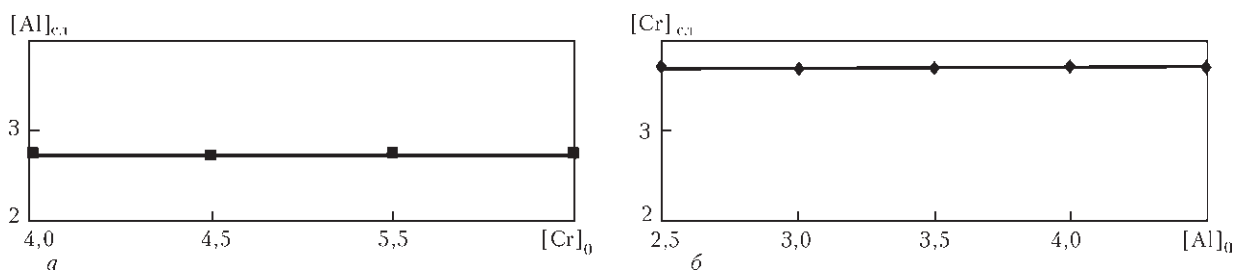


Рис. 4. Зависимости содержания алюминия (а) и хрома (б) в слитке от начальной концентрации другого элемента в исходной шихте

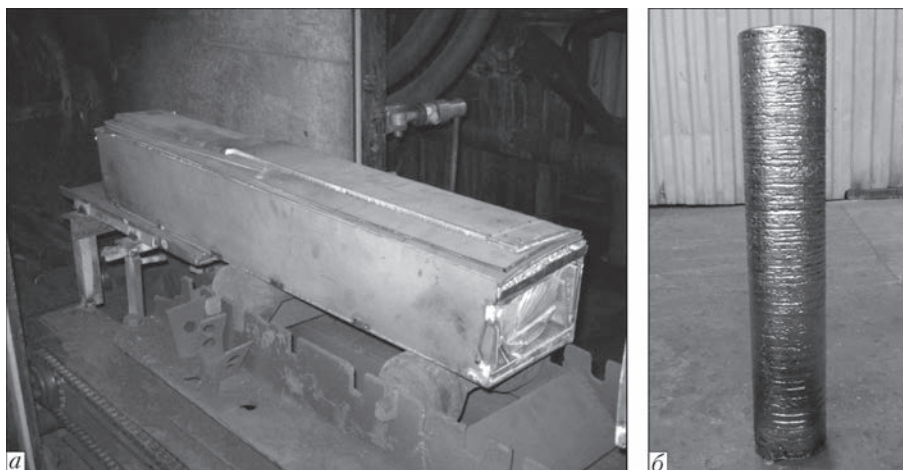


Рис. 5. Исходная шихта (а) и полученный слиток сплава ВТ19 (б)

Фактический и расчетный химические составы сплава ВТ19, мас. %						
Металл	Al	Cr	V	Mo	Zr	Ti
Исходная шихта	3,57	5,29	3,38	5,23	0,88	
Слиток ЭЛП:						Остальное
экспериментальный	3,35	4,19	3,50	5,24	0,91	
расчетный	3,22	4,34	3,43	5,32	0,90	

титан, алюминий, ванадий, а также электролитический хром, молибден и цирконий. Шихтовые материалы помещались в расходуюемый короб согласно технологическим схемам (рис. 5, а). Плавки вели по следующим технологическим режимам: мощность электронно-лучевого нагрева в кристаллизаторе — 20, в промежуточной емкости и заготовке — 120 кВт, скорость плавки — 30 кг/ч. Получены слитки диаметром 110 и длиной до 800 мм (рис. 5, б).

Анализ химического состава полученных слитков показал, что построенная математическая модель описывает процесс испарения легирующих элементов из титанового сплава ВТ19 при ЭЛП с достаточно высокой степенью точности (таблица).

Относительная погрешность расчетных результатов от экспериментальных данных при ЭЛП слитков сплава ВТ19 составила для: алюминия и хрома — 4; ванадия — 2; молибдена — 1,5; циркония — 1, отн. %.

Таким образом, по результатам проведенных расчетов установлено, что для обеспечения заданного химического состава слитка сплава ВТ19 диаметром 110 мм оптимальная скорость плавки составляет 30...40 кг/ч при мощности электронно-лучевого нагрева, кВт: в кристаллизаторе — 20, в промежуточной емкости и заготовке — 120, что подтверждается экспериментальными данными.

### Выводы

1. Установлено, что основным фактором, влияющим на концентрацию алюминия и хрома в слитке при неизменных технологических параметрах плавки, является только их исходное содержание в расходуюемой заготовке. Это необходимо учитывать при расчете шихтовой заготовки.

2. Показано, что испарение легирующих элементов сплава с высокой упругостью пара (алюминия и хрома) проходит независимо друг от друга.

3. Определено, что для получения качественного слитка диаметром 110 мм необходимо обеспечить скорость плавки 30...40 кг/ч при мощности электронно-лучевого нагрева в кристаллизаторе — 20, в промежуточной емкости и заготовке — 120 кВт.

4. На основании анализа результатов экспериментальных данных показано, что построенная математическая модель описывает процесс испарения легирующих элементов из титанового сплава VT19 при ЭЛП с высокой степенью точности.

1. Ильин А. А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, И. С. Полькин. — М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. — 520 с.
2. Хореев А. И. Сверхпрочный титановый сплав VT19 / А. И. Хореев // Технология машиностроения. — 2012. — № 6. — С. 2–5.
3. Патон Б. Е. Электронно-лучевая плавка титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. — Киев: Наук. думка, 2006. — 246 с.

4. Варич И. Ю. Испарение алюминия из сплавов на основе титана в процессе электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью / И. Ю. Варич, С. В. Ахонин, Н. П. Тригуб [и др.] // Проблемы специальной электрометаллургии. — 1997. — № 4. — С. 15–21.
5. Akhonin S. V. Mathematical Modeling of Aluminum Evaporation During Electron-Beam Cold-Hearth Melting of Ti–6Al–4V Ingots / S. V. Akhonin, N. P. Trigub, V. N. Zamkov [et al.] // Metallurgy and Materials Transactions B. — 2003. — Vol. 34B, August. — P. 447–454.
6. Ахонин С. В. Математическое моделирование процессов испарения при выплавке слитков многокомпонентных титановых сплавов в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью / С. В. Ахонин, А. Ю. Северин, В. А. Березос [и др.] // Современная электрометаллургия. — 2013. — № 4. — С. 34–39.
7. Иванченко Н. В. Термодинамический анализ испарения в вакууме титана и никеля из расплава Ti–Ni / Н. В. Иванченко, А. И. Устинов, В. А. Мохорт // Современная электрометаллургия. — 2003. — № 3. — С. 15–18.
8. Жук Г. В. Математическое моделирование процессов кристаллизации титанового сплава Ti–6Al–4V при ЭЛПЕ / Г. В. Жук, Л. В. Ахонина, Н. П. Тригуб // Проблемы специальной электрометаллургии. — 1998. — № 2. — С. 21–26.

Using the methods of mathematical modeling the effect of technological parameters of electron beam melting on content of alloying elements in ingot of titanium alloy VT19, and also adequacy of a plotted mathematical model for the multicomponent titanium alloys were evaluated. Having based on calculations, the optimum technological modes of electron beam melting were determined and a series of experimental melting of alloy VT19 ingots of 110 mm diameter was performed. The peculiar features of electron beam melting of high-strength titanium alloy VT19, which are necessary to account in preparation and melting of the given alloy were revealed from the results of works. Analysis of the results of the experimental data showed that the mathematical model describes the process of evaporating of alloying elements from titanium alloy VT10 in electron beam melting at a sufficiently high degree of accuracy and can be used for producing ingots with the preset chemical composition. Ref. 8, Table 1, Figures 5.

**Key words:** electron beam melting; titanium alloy; evaporation; mathematical modeling

Поступила 29.03.2016

## КОЛЕСА ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОЕЗДОВ

В следующем году китайская компания «Masteel» начнет серийное производство колес для высокоскоростных поездов. До сих пор все колеса для таких поездов импортировались в Китай.

В настоящее время «Masteel» тестирует два типа колес: для движения со скоростью до 250 км/ч и 350 км/ч. Оба типа уже прошли более 200 тыс. км со скоростью, превышающей 300 км/ч. Все тестовые прогоны составляют 600 тыс. км. Компания объявила, что введение колес местного производства приведет к существенному снижению цен на них не только на китайском рынке, но и на экспорт, который входит в планы «Masteel». В течение первых четырех месяцев текущего года компания продала 32400 т железнодорожных колес.

В конце этого года, как ожидается, начнется тестирование первой оси для высокоскоростных поездов, которые также намеревается производить «Masteel». По данным China Daily строительство первого завода, который должен ежегодно производить 40 000 осей для разных типов поездов, началось в апреле.

<http://www.azovpromstal.com/news/one/>

