

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник; в 3 т. / под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение. – 1999. - Т. 3. - Кн. 1. – 880 с.: ил.
2. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / под ред. Гуревича С.М. – К.: Наукова думка, 1979. – 300 с.
3. Николаев Г.И. Металл века / Г.И. Николаев.– М.: Металлургия.– 1987.– 168 с.
4. Рябцев А.Д. Электрошлаковый переплав металлов и сплавов под флюсами с активными добавками в печах камерного типа / А.Д.Рябцев, А.А. Троянский // Электрометаллургия. – 2005 – № 4. – С. 25-3
5. Легирование металла азотом из газовой фазы в процессе ЭШП / А.Д. Рябцев, А.А. Троянский, Е.Л. Корзун, В.Ю. Мастепан // Проблемы специальной электрометаллургии. – 2002 – № 4. – С. 3-8.
6. Получение титана повышенной прочности путем легирования кислородом в процессе камерного электрошлакового переплава / А.Д.Рябцев, С.И.Давыдов, А.А.Троянский, Л.Я.Шварцман и др. // Современная электрометаллургия. – 2007 – № 3. – С.3-6.
7. Использование электрошлаковой технологии для рафинирования титана и титановых сплавов от обогащенных азотом включений / А.Д.Рябцев, А.А.Троянский, В.В.Пашинский, М.В.Самборский и др. // Проблемы специальной электрометаллургии. – 2002 – № 3. – С. 10-13.
8. Влияние легирования кислородом титана губчатого на структуру и механические свойства литого титана / А. В.Овчинников , С. И.Давыдов , В. Г.Шевченко , Л. Я.Шварцман и др. // Сборник трудов международной конференции «Ti-2007 в СНГ». – 2007. – С. 170-173.

Поступила в редакцию 28.04.2010

Рецензент канд.техн.наук, проф. А.Х. Дымнич

© Рябцева О.А., Пашинский В.В., Ратиев С.Н., 2010

УДК 621.745

Д.С. Ахонин, С.Н. Ратиев

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В СЛИТКАХ ТИТАНА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

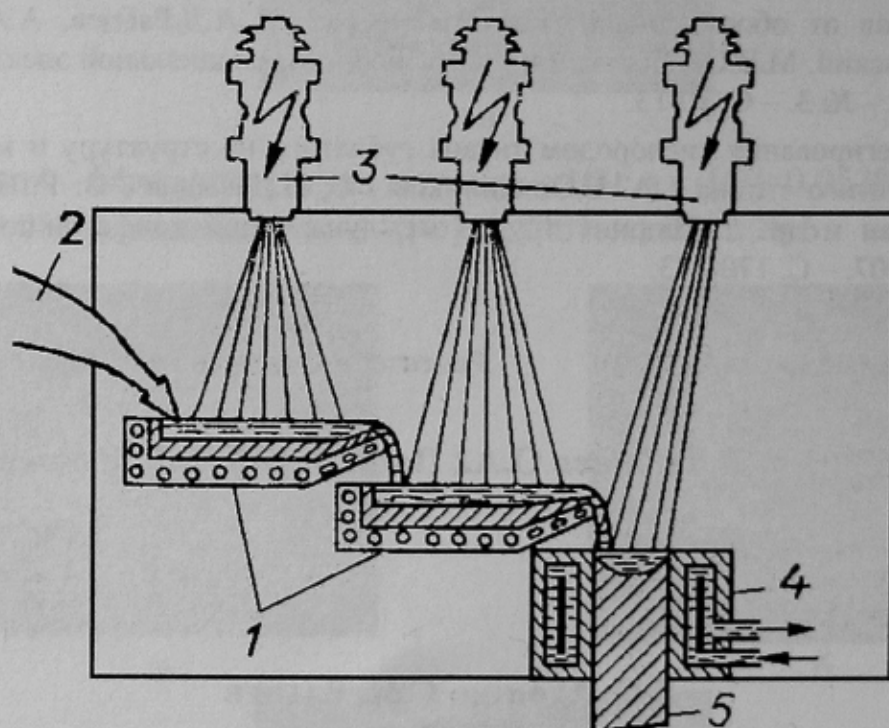
Построена математическая модель поведения примесей в процессе электронно-лучевой плавки титана. Для случая плавки с двумя промежуточными емкостями проанализировано распределение кислорода и железа по длине слитка нелегированного титана.

Ключевые слова: титан, электронно-лучевой переплав, математическая модель, распределение примесей

Введение

В настоящее время широкое распространение при производстве слитков титана получила технология электронно-лучевой плавки [1, 2]. К ее достоинствам следует отнести высокую эффективность рафинирования от примесных элементов с высокой упругостью пара и неметаллических включений, обусловленную высоким вакуумом в камере электронно-лучевой установки, наличием независимого источника нагрева, а также разделением процессов плавления и кристаллизации за счет использования одной или двух промежуточных емкостей [3, 4].

Технологический процесс электронно-лучевой плавки (ЭЛП) осуществляется в высоком вакууме $0,1 \dots 0,01$ Па и заключается в расплавлении исходной шихты под действием нагрева электронными лучами, рафинировании жидкого металла в промежуточных емкостях от вредных примесей и неметаллических включений и последующего формирования слитка в кристаллизаторе (рис. 1).



1 – промежуточные емкости; 2 – исходная шихта; 3 – электронные пушки; 4 – водоохлаждаемый кристаллизатор; 5 – слиток

Рисунок 1 – Схема электронно-лучевой установки.

Значительное влияние на свойства титана оказывают такие примеси, как азот, кислород, железо и углерод, содержание которых регламентируется требованиями стандартов. Даже небольшие количества этих элементов снижают пластичность и повышают прочность и твердость металла, снижая его эксплуатационные характеристики [5]. Поэтому важнейшим

критерием качества получаемых слитков является однородность распределения этих элементов по длине слитка.

Цель работы

Целью настоящей работы является определение закономерностей поведения примесей в титане в процессе ЭЛП методами математического моделирования.

Основная часть

Рассмотрим поведение примесей в титане в процессе плавки с использованием двух промежуточных медных водоохлаждаемых ёмкостей [3, 4]. Исходная шихта в виде кусочков лами и губчатого титана поступает в первую промежуточную ёмкость, где под действием электронных лучей происходит её плавление. По мере накопления жидкий титан перетекает во вторую промежуточную ёмкость, по которой расплав перемещается к медному водоохлаждаемому кристаллизатору и переливается в него. В кристаллизаторе происходит затвердевание металла. По мере формирования слиток вытягивают в камеру слитка, поддерживая уровень расплава в диапазоне 5...15 мм от верхнего среза кристаллизатора. Процесс плавки продолжают в непрерывном режиме до формирования слитка необходимой длины.

Математическую модель процесса поведения примеси в процессе ЭЛП титана будем строить путем составления уравнений материального баланса для примеси в титане. При этом для математического описания сложного металлургического процесса разделим его на три фактически существующие стадии, характеризующиеся интенсивным перемешиванием жидкого металла, а связи каждой стадии между собой заменим массопотоками [6].

Характерной особенностью описываемого нами процесса ЭЛП с двумя промежуточными емкостями является наличие трех зон плавки: ванны жидкого металла в первой и второй промежуточных емкостях, а также в кристаллизаторе.

Следует отметить, что из-за высокой химической активности титана он обладает высоким сродством к азоту, кислороду, железу и углероду, которые в процессе вакуумной плавки из титана не удаляются [7]. При этом процесс ЭЛП титана происходит в высоком вакууме, поэтому дополнительного загрязнения титана этими примесями из окружающей среды не происходит.

Пусть скорость плавки постоянна и составляет m (кг/ч), а в начальный момент времени (начало плавки) в первой и второй промежуточных емкостях находится титановый гарнисаж с содержанием примеси C_I (%) и C_{II} (%), соответственно, а содержание примеси в исходной шихте равно C_0 (%).

Запишем уравнение материального баланса примеси в расплаве титана первой и второй промежуточных емкостях, а также в кристаллизаторе:

$$\frac{\partial(M_1 C_1)}{\partial \tau} = m C_0 - m C_1; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(M_2 C_2)}{\partial \tau} = m C_1 - m C_2; \quad (2)$$

$$\frac{\partial(M_3 C_3)}{\partial \tau} = m C_2 - m C_3, \quad (3)$$

где M_1, M_2, M_3 – массы расплава в ванне первой и второй промежуточных емкостях, соответственно, и в кристаллизаторе, кг; C_1, C_2, C_3 – текущие значения концентрации примеси в расплаве титана первой и второй промежуточных емкостях, а также в кристаллизаторе, %.

В начальный момент времени должны выполняться равенства:

$$\begin{aligned} C_1(0) &= C_I; \\ C_2(0) &= C_{II}; \\ C_3(0) &= C_{II}. \end{aligned} \quad (4)$$

Так как тепловые условия плавки являются стационарными, то массы расплава в первой и второй промежуточных емкостях, а также в кристаллизаторе остаются постоянными, т. е. $M_1 = \text{const}, M_2 = \text{const}, M_3 = \text{const}$. В этом случае система уравнений (1-3) с начальными условиями (4) представляет собой систему линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами [8], решение которой будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} C_3(\tau) &= C_0 + \frac{m_2 \cdot m_3 \cdot (C_I - C_0)}{(m_1 - m_2) \cdot (m_1 - m_3)} \cdot \exp(-m_1 \cdot \tau) + \\ &+ \frac{m_1 \cdot m_3 \cdot (C_{II} - C_0) - m_2 \cdot m_3 \cdot (C_{II} - C_I)}{(m_1 - m_2) \cdot (m_3 - m_2)} \cdot \exp(-m_2 \cdot \tau) + \\ &+ \frac{m_2}{(m_3 - m_2)} \cdot \left[\frac{m_1}{(m_3 - m_1)} \cdot (C_I - C_0) - (C_{II} - C_0) \right] \cdot \exp(-m_3 \cdot \tau), \end{aligned} \quad (5)$$

где $m_1 = m/M_1, m_2 = m/M_2, m_3 = m/M_3$ – константы, зависящие от скорости плавки.

Следует отметить, что решение (5) справедливо при следующих условиях: $m_1 \neq m_2, m_1 \neq m_3, m_2 \neq m_3$.

Построенная математическая модель (5) позволяет определить распределение примесей по длине слитка титана, полученного методом электронно-лучевой плавки.

В качестве примера рассмотрим поведение кислорода в процессе электронно-лучевой выплавки слитка нелегированного титана с целью установления возможности использования гарнисажей предыдущих плавов при выплавке слитков нелегированного титана другой марки.

Анализ международных спецификаций на слитки нелегированного титана показал, что содержание в них азота, водорода, углерода и целевое содержание железа для всех марок титана практически одинаковое, тогда как максимальная концентрация кислорода меняется от 0,06% для сплава Grade 1S до 0,25% для сплава Grade 2. Поэтому, для определения возможности использования гарнисажей предыдущих плавов при выплавке слитков нелегированного титана другой марки, определим по построенной математической модели (5) распределение кислорода по длине выплавляемого сляба из нелегированного титана марки Grade 1S с использованием гарнисажа после выплавки сляба из нелегированного титана марки Grade 2 с содержанием кислорода 0,25%. В этом случае начальные условия математической модели (5) будут иметь следующие значения: $C_0 = 0,045\%$, $C_I = C_{II} = 0,25\%$.

Применительно к электронно-лучевой плавке титана в кристаллизатор диаметром 736 мм расчетно-экспериментальная оценка объемов жидкого металла в технологической оснастке позволила определить массы расплава в первой и второй промежуточных емкостях – 60 и 30 кг, соответственно, а также массу расплава в кристаллизаторе – 400 кг для скорости плавки $m = 1100$ кг/ч [9].

С учетом вышеуказанных технологических параметров по построенной математической модели (5) были проведены расчеты, которые показали, что использование гарнисажа с содержанием кислорода в количестве 0,25% при выплавке слитка нелегированного титана марки Grade 1S дает следующее распределение кислорода по длине слитка (рис. 2).

Анализ полученной зависимости показал, что в донной части слитка длиной до 120 мм концентрация кислорода превышает максимально возможное содержание кислорода в нелегированном титане марки Grade 1S (0,06%), а на расстоянии 150 мм от низа слитка концентрация кислорода равна 0,051%. Следовательно, за исключением донной части слитка длиной 150 мм, которая отрезается при последующей прокатке слитка, содержание кислорода полностью соответствует требованиям стандартов.

Технология электронно-лучевой плавки титана наиболее экономически эффективна при использовании в качестве исходной шихты кускового лома. В процессе подготовки титанового лома к плавке в исходную шихту по тем или иным причинам может попасть кусок железа. Рассмотрим поведение примеси железа в титане в процессе плавки в этом случае методами математического моделирования.

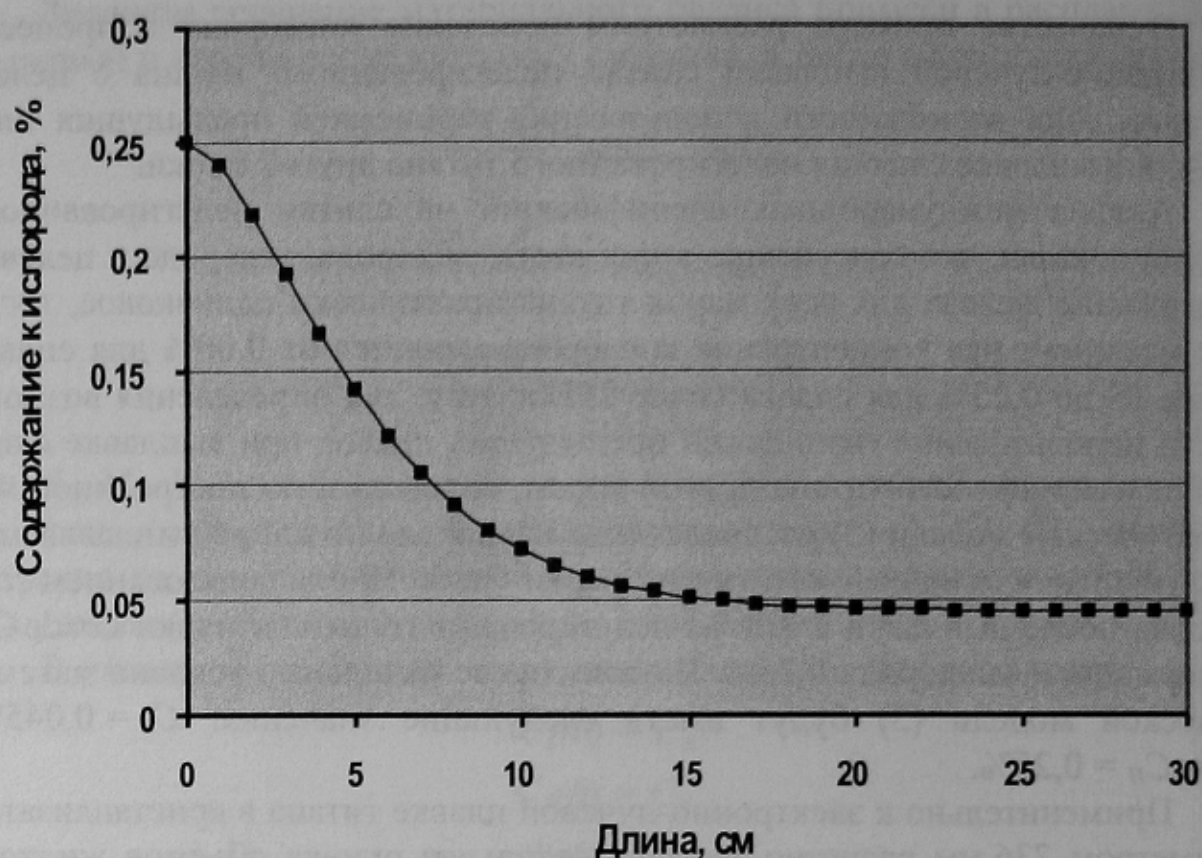


Рисунок 2 – Распределение кислорода по длине слитка из нелегированного титана марки Grade 1S при использовании гарнисажа марки Grade 2.

Пусть в момент времени $\tau = 0$ мин. в первую промежуточную емкость вместе с очередной порцией переплавляемого титанового лома попадает кусок железа массы m_0 (кг), который практически сразу растворяется в ванне жидкого титана массы M_1 (кг). В результате этого концентрация железа в расплаве титана, находящегося в первой промежуточной емкости C_I (%) станет равной:

$$C_I = \frac{100 \times m_0 + M_1 C_0}{M_1} \quad (6)$$

Статистическая обработка результатов химического анализа различных партий лома нелегированного титана показала, что среднее содержание железа в титановом ломе составляет 0,035%, т.е. при расчетах можно принять: $C_0 = C_{II} = 0,035\%$.

Размеры переплавляемых кусков титанового лома, как правило, не превышает $80 \times 80 \times 15$ мм, поэтому масса куска железа не превышает 750 грамм, что, согласно формулы (6), дает оценку максимальной концентрации железа в первой промежуточной емкости после попадания в неё куска железа: $C_I = 1,285\%$.

Применительно к вышеуказанным начальным условиям и технологическим параметрам электронно-лучевой плавки титана по построенной ма-

тематической модели (5) было определено распределение железа по длине выплавляемого сляба после попадания в промежуточную ёмкость куска железа (рис. 3).

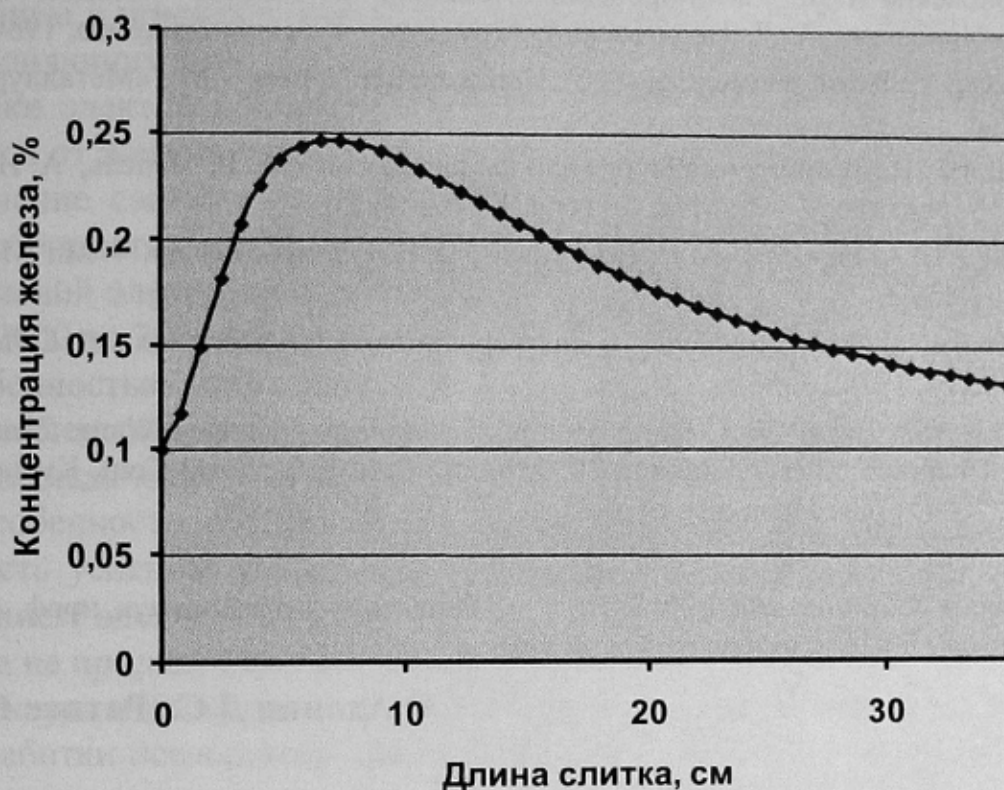


Рисунок 3 – Зависимость концентрации железа в слитке титана

Анализ полученных результатов показывает, что максимальное содержание железа в слитке титана после попадания в исходную шихту куска железа не превышает 0,25% (масс.), то есть, находится в пределах требований стандартов для нелегированного титана.

Выводы

Таким образом, методами математического моделирования показано, что при электронно-лучевой выплавке слитков нелегированного титана можно использовать гарнисаж из нелегированного титана любых марок, а попадание в исходную шихту куска железа массой до 0,75 кг не приводит к выплавке бракованного слитка по содержанию железа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seagle S. R. New titanium developments in products, processes and applications in the USA // Titanium-1990: intern. conf. V.I. Dayton, USA, 1990. – PP. 66-73.
2. Shamblen C. E. Titanium alloy hearth melt «only» technology // Titanium-1995. Science and Technology: – proceedings of the Eight World Conference on Titanium, Birmingham, UK, 1995. – PP. 1438-1445.

3. Мовчан Б.А. Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов / Б. А. Мовчан, А. Л. Тихоновский, Ю. А. Курапов. – К.: Наукова думка, 1972. – 240 с.
4. Тихоновский А. Л. Рафинирование металлов и сплавов методом электронно-лучевой плавки / А. Л. Тихоновский, А. А. Тур. – К.: Наукова думка, 1984. – 273 с.
5. Цвиккер У. Титан и его сплавы / У. Цвиккер; пер. с нем. – М.: «Металлургия», 1979. – 512 с.
6. Попель С. И. Теория металлургических процессов / С. И. Попель, А. И. Сотников, В. Н. Бороненков. – М.: Металлургия, 1986. – 462 с.
7. Титан / В. А. Гармата, А. Н. Петрунько, Н. В. Галицкий и др. – М.: Металлургия, 1983. – 559 с.
8. Понтрягин Л. С. Обыкновенные дифференциальные уравнения / Л. С. Понтрягин. – М.: Наука, 1970. – 356 с.
9. The Electron Beam Cold Hearth Melting Technology / Xiaojun Wang, Zhanqian Chen, Feng Chen and other // Titanium-2007: proc. of the 11th World Conf, Kyoto, Japan, 3-7 June, 2007. – The Japan Inst. of Metals. – 2007. – PP. 185-188.

Поступила в редакцию 29.04.2010

Рецензент д-р техн. наук, проф. А.Д. Рябцев

© Ахонин Д.С., Ратиев С.Н., 2010

УДК 543:621.35

В.И. Алимов, И.А. Уманская, М.В. Георгиаду

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗНЕННОГО СЛОЯ НА СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

Изучено строение и свойства железненных слоев на стали, в том числе, при тепловых и механических воздействиях; установлено повышение показателей износо- и коррозионной стойкости.

Ключевые слова: покрытие, железнение, структура, микротвердость, износостойкость, коррозионная стойкость

Введение

Наращивание железного слоя на металлическую подложку является способом восстановления изношенных деталей машин. Высокая производительность, простота осуществления технологического процесса, дешевизна и доступность исходных материалов, возможность получения осадков с нужными физико-механическими свойствами при низкой себестоимости восстановления, при больших скоростях наращивания покрытия, отсутствие термического воздействия на деталь, а значит, и коробления – все это выгодно отличает железнение от традиционных способов сварки и наплавки [1, 2].