



УДК 669.187.826

## УДАЛЕНИЕ ТУГОПЛАВКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ ИЗ ТИТАНА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКЕ ПО МЕХАНИЗМУ ОСАЖДЕНИЯ

С. В. Ахонин, М. П. Кругленко, В. И. Костенко

Рассмотрены процессы удаления тугоплавких включений из титана при электронно-лучевой плавке (ЭЛП) с промежуточной емкостью. Установлены закономерности процесса гравитационного осаждения на поверхность гарнисажа насыщенных примесями внедрения частиц  $\alpha$ -титана, а также включений в виде нитридов, оксидов титана и карбидов тугоплавких металлов, позволяющие определить требуемые габариты промежуточной емкости для обеспечения гарантированного удаления тугоплавких включений из титана путем их осаждения при ЭЛП.

Processes of removal of refractory inclusions of titanium in electron beam cold hearth melting are considered. The regularities are established for process of gravitation precipitation on the surface of skull of  $\alpha$ -titanium particles, saturated with interstitial impurities, and inclusions in the form of nitrides and titanium oxides and carbides of refractory metals, allowing determination of required dimensions of a cold hearth to provide a guaranteed removal of refractory inclusions of titanium by their precipitation in EBM.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая плавка; промежуточная емкость; титан; тугоплавкие включения; гравитационное осаждение

Важной проблемой, стоящей перед всеми промышленными производителями титановых слитков и полуфабрикатов, является задача удаления из металла включений с повышенным содержанием стабилизирующих  $\alpha$ -фазу примесей внедрения: азота, кислорода и углерода, которые состоят из твердых частиц  $\alpha$ -титана, насыщенных этими примесями, а также из химических соединений этих элементов с титаном — нитридов, оксидов и карбидов, а также их комплексных соединений (типа оксикарбонитридов). В мировой литературе такие включения получили название включений низкой плотности — LDI (Low Density Inclusion) [1].

Твердость этих частиц более чем в три раза выше, чем у титановой матрицы. Кроме того, они склонны к хрупкому разрушению. Поэтому указанные частицы являются концентраторами напряжения и источниками зарождения усталостных трещин [2], приводящих к разрушению высоконагруженных деталей ответственного назначения и, как следствие, — к катастрофическим авариям.

Кроме азотсодержащих включений низкой плотности, серьезную проблему в слитках титана представляют и включения, образованные химическими соединениями с большой плотностью и высокой температурой плавления — так называемые включения высокой плотности HDI (High Density Inclusions)

[3]. Источниками их образования, как правило, являются осколки режущего инструмента на основе карбидов тугоплавких металлов (WC, MoC и др.), которые попадают в металл вместе с шихтовыми компонентами, чаще всего со стружкой. Наличие дефектов типа HDI в изделиях значительно снижает значения усталостных характеристик металла.

Удалить тугоплавкие включения LDI и HDI способом вакуумно-дугового переплава (ВДП) весьма затруднительно, они обнаруживаются в титане даже после тройного ВДП слитков [4]. Низкая эффективность технологии ВДП по отношению к процессам рафинирования титана от включений LDI и HDI обусловлена тем, что плотность большинства таких включений выше, чем у жидкого титана. После попадания в ванну жидкого расплава они быстро опускаются на дно и на фронте кристаллизации вмораживаются в металл слитка.

Полное устранение включений LDI и HDI является одной из важнейших задач усовершенствования технологии выплавки слитков из титана и его сплавов, используемых для изготовления деталей ответственного назначения.

Для удаления включений LDI и HDI из жидкого титана используют технологии переплава с промежуточной емкостью [5]. Источником нагрева расплава в промежуточной емкости может служить или электронный луч, или плазменная дуга. Наиболее распространена в промышленности технология электронно-лучевой плавки титана с промежуточной емкостью (рис. 1).

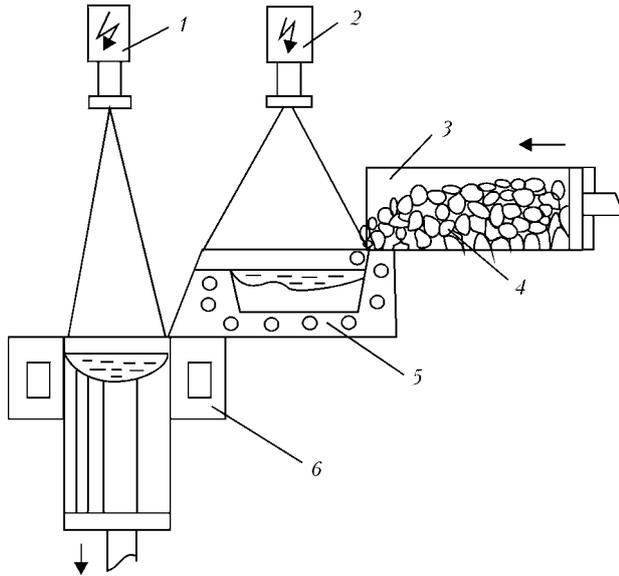


Рис. 1. Технологическая схема электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью: 1, 2 – электронные пушки; 3 – механизм загрузки; 4 – исходная шихта; 5 – промежуточная емкость; 6 – кристаллизатор

Промежуточная емкость (холодный под) представляет собой медную водоохлаждаемую поверхность, ограниченную стенками, в одной из которых выполнен проем для слива жидкого металла (сливной носок). В нее электронными лучами сплавляется шихта, подаваемая из камеры загрузки.

Промежуточная емкость служит для усреднения химического состава, рафинирования расплава от примесей и включений. В процессе плавки на дне промежуточной емкости образуется гарнисаж в виде слоя закристаллизовавшегося металла, который предохраняет стенки и дно от взаимодействия с расплавленным металлом.

Одним из основных механизмов удаления тугоплавких включений из титана является их гравитационное осаждение: в процессе плавки жидкий металл в промежуточной емкости течет горизонтально, тогда как включения с более высокой плотностью, чем у жидкого титана, под действием силы тяжести опускаются вниз (рис. 2), осаждаются на поверхность гарнисажа и вмораживаются в него.

Для определения закономерностей удаления тугоплавких включений LDI и HDI из титана при электронно-лучевой плавке по механизму осаждения примем во внимание, что согласно закону Стокса, в области небольших чисел Рейнольдса ( $Re < 100$ ) скорость движения частицы в жидкости прямо пропорциональна значению движущей силы. Для тугоплавкой частицы в виде шара в жидком металле скорость осаждения  $v$  под действием силы тяжести может быть рассчитана согласно уравнению Стокса [6]:

$$v = \frac{2}{9} \frac{\Delta \rho g r^2}{\eta}, \quad (1)$$

где  $\Delta \rho = \rho_{in} - \rho_{Ti}$  – разность между плотностями соответственно включения и жидкого титана,  $кг/м^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $м/с^2$ ;

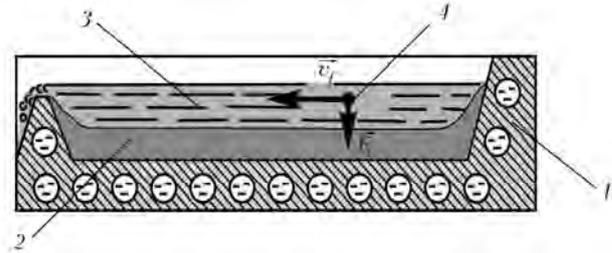


Рис. 2. Схема процесса осаждения тугоплавкого включения: 1 – промежуточная емкость; 2 – гарнисаж; 3 – расплав; 4 – тугоплавкое включение

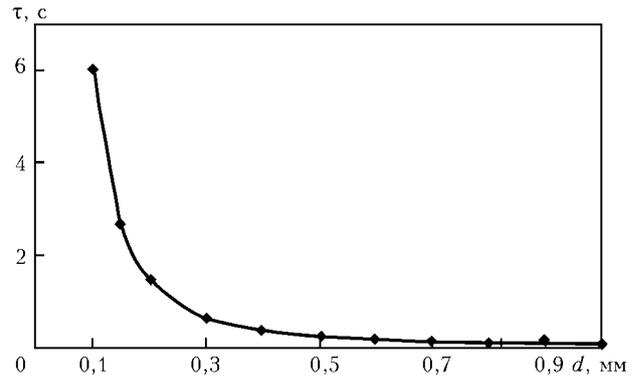


Рис. 3. Зависимость времени осаждения  $\tau$  включения карбида вольфрама от его диаметра

$r$  – радиус включения,  $м$ ;  $\eta$  – коэффициент вязкости жидкого титана,  $Па \cdot с$ .

С учетом выражения (1) время осаждения тугоплавкого включения  $\tau_s$  на дно ванны жидкого металла может быть оценено с помощью следующего уравнения:

$$\tau_s = \frac{h}{v} = \frac{18\eta h}{\Delta \rho g d^2}, \quad (2)$$

где  $h$  – глубина ванны расплава в промежуточной емкости,  $м$ ;  $d$  – характерный размер включения,  $м$ .

Следует отметить, что при электронно-лучевой плавке глубина ванны расплава в промежуточной емкости, как правило, не превышает  $0,03 м$ . Для жидких металлов, в том числе и для титана, коэффициент вязкости  $\eta$  может составлять  $5 \times 10^{-3} Па \cdot с$  [6], а плотность жидкого титана равняется  $4110 кг/м^3$ .

В качестве примера рассчитаем время осаждения включения в виде карбида вольфрама, плотность которого составляет  $14000 кг/м^3$  (рис. 3).

Анализ полученных результатов показал, что тугоплавкие включения высокой плотности осаждаются в гарнисаж очень быстро (включение диаметром  $0,5 мм$  проходит через толщину жидкой ванны расплава в промежуточной емкости за  $0,25 с$ ). При этом длительность осаждения включения высокой плотности обратно пропорциональна его размеру. Так, продолжительность осаждения включения диаметром  $100 мкм$  достигает уже  $6 с$ .

Важным технологическим и конструктивным параметром технологии ЭЛП являются габариты промежуточной емкости, длина которой должна быть достаточной для гарантированного осаждения тугоплавких включений критического размера. Для оп-



ределения зоны промежуточной емкости, в которой происходит осаждение тугоплавких включений высокой плотности, определим скорость течения жидкого титана в процессе электронно-лучевой плавки.

Линейная скорость течения жидкого титана  $v_f$  определяется геометрическими размерами промежуточной емкости и связана с массовой скоростью плавки следующим соотношением:

$$v_f = \frac{m}{3600 h S \rho_{Ti}}, \quad (3)$$

где  $m$  – массовая скорость плавки, кг/ч;  $S$  – ширина потока расплава титана в промежуточной емкости, м.

Например, для ширины потока расплава  $S = 0,4$  м, глубины ванны расплава в промежуточной емкости  $h = 0,03$  м и массовой скорости плавки  $m = 500$  кг/ч скорость потока жидкого титана составит  $3 \cdot 10^{-3}$  м/с.

В случае попадания тугоплавкого включения диаметром  $d$  в промежуточную емкость до момента осаждения на поверхность гарнисажа оно будет перенесено потоком жидкого титана на расстояние  $L$ , которое может быть рассчитано следующим образом:

$$L = v_f \tau_S = \frac{m \eta}{200 S \rho_{Ti} \Delta \rho g d^2}, \quad (4)$$

Считая критическим размером тугоплавкого включения 100 мкм, по формуле (4) для карбида вольфрама можно определить, что путь включения от момента попадания в промежуточную емкость до места осаждения на поверхность гарнисажа составит 8 мм.

Следует отметить, что расстояние, на которое переносится включение потоком жидкого металла, не зависит от такого трудно определяемого параметра плавки, как глубина ванны, что позволяет существенно повысить точность расчетов.

Наиболее распространенным типом включений низкой плотности LDI являются частицы  $\alpha$ -титана с повышенным содержанием стабилизирующих  $\alpha$ -фазу примесей внедрения (азота, кислорода), образующихся в процессе производства титановой губки. Они составляют около 95 % всех тугоплавких включений типа LDI [7].

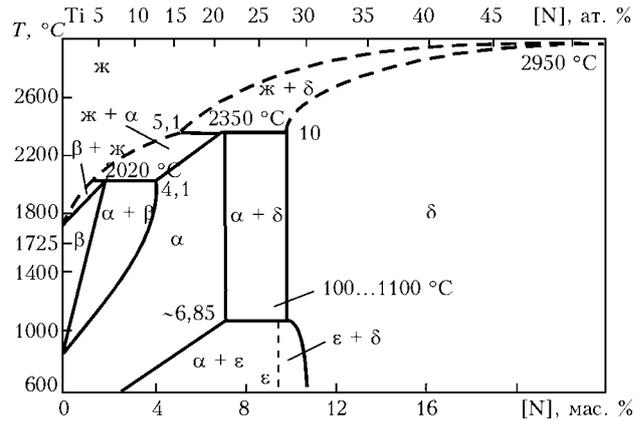


Рис. 4. Диаграмма состояния системы титан-азот

Согласно диаграммам состояния систем титан-азот и титан-кислород, увеличение концентрации примесей внедрения в титане приводит к повышению температуры плавления частиц титана, обогащенных этими примесями. Так, например, температура плавления  $\alpha$ -титана при содержании азота более 4,1 % превышает 2020 °С (рис. 4), тогда как температура плавления чистого титана составляет 1668 °С.

Плотность титана в твердом состоянии при комнатной температуре равна 4500 кг/м<sup>3</sup>. Для определения плотности частиц  $\alpha$ -титана, насыщенных азотом и кислородом при температуре плавления титана, примем во внимание, что коэффициент линейного расширения титана в диапазоне температур 20... 1668 °С, согласно данным справочника [8], может быть аппроксимирован выражением  $\alpha = 1,04 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . С учетом этого при достижении температуры жидкого титана линейные размеры включения возрастут на 1,7 %, а плотность частиц  $\alpha$ -титана составит 4278 кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, разница плотности между твердыми частицами  $\alpha$ -титана и жидким титаном достигнет  $\Delta \rho = 168 \text{ кг/м}^3$ . Подставляя в формулу (4) рассчитанные значения, получим следующую зависимость пути  $L$  включения  $\alpha$ -титана до момента его осаждения на дно ванны расплава в промежуточной емкости от скорости плавки и диаметра включения:

$$L = \frac{3,7 \cdot 10^{-12} m}{S d^2}. \quad (5)$$

Расчетная плотность некоторых включений LDI при температуре 1668 °С				
Тип включения	Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	Температура плавления, °С	Плотность при 1668 °С, кг/м <sup>3</sup>	$\Delta \rho = \rho_m - \rho_{Ti}$ при 1668 °С, кг/м <sup>3</sup>
Нитрид титана TiN	5210	2950	4952	842
Карбид титана TiC	4940	3067	4696	586
Оксид титана TiO	4930	1780	4686	576
Рутил TiO <sub>2</sub>	4235	1870	4026	-84
Антакс TiO <sub>2</sub>	4050	1870	3850	-260
Брукит TiO <sub>2</sub>	4120	1870	3916	-194

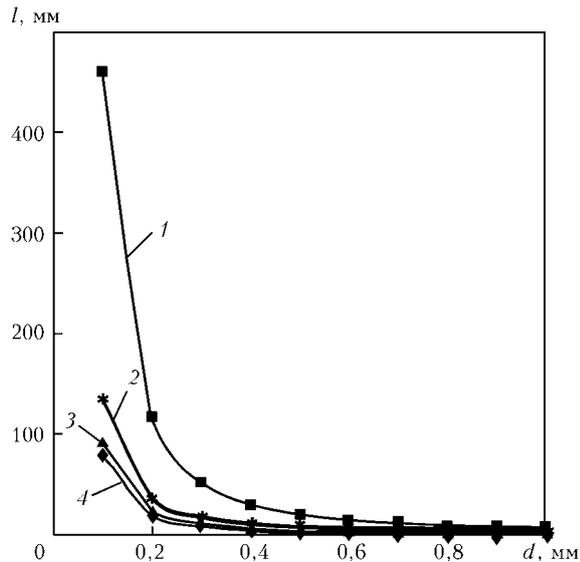


Рис. 5. Зависимость пути  $l$  включения низкой плотности до осаждения на поверхность гарнисажа от его размера: 1 –  $\alpha$ -Ti; 2 – TiO; 3 – TiN; 4 – WC

Например, для включения  $\alpha$ -титана диаметром 100 мкм при скорости плавки 500 кг/ч и ширине потока расплава титана в промежуточной емкости 0,4 м этот путь  $L$  составит 0,46 м от места падения (рис. 5).

Кроме тугоплавких включений  $\alpha$ -титана, включения низкой плотности LDI могут представлять собой частицы нитридов, оксидов и карбидов. Для определения возможности их удаления из расплава титана рассчитаем плотность этих включений при температуре жидкого титана в предположении, что коэффициент их линейного расширения равен таковому титана (таблица).

Анализ полученных результатов показал, что в процессе электронно-лучевой плавки все тугоплавкие соединения титана с примесями внедрения, за исключением диоксидов титана различного кристаллического строения, будут осаждаться на дно промежуточной емкости и удаляться из расплава. При этом включения карбида титана и оксида титана одинакового размера будут осаждаться на поверхность гарнисажа на одном и том же расстоянии от места попадания в расплав, так как их плотности практически одинаковы. В то же время включения диоксида титана всплывут на поверхность расплава под действием силы Архимеда.

Следовательно, тугоплавкими включениями, переносимыми потоком титана на максимальное расстояние от места попадания в промежуточную емкость, являются насыщенные примесями внедрения частицы  $\alpha$ -титана. Поэтому при конструировании промежуточной емкости, обеспечивающей гарантированное удаление тугоплавких включений путем их осаждения, необходимо учитывать планируемую скорость плавки и рассчитывать габариты промежуточной емкости с помощью формулы (5).

Таким образом, в процессе электронно-лучевой плавки титана практически все тугоплавкие включения высокой LDI и низкой HDI плотности, за исключением диоксидов титана, будут осаждаться на дно промежуточной емкости и удаляться из расплава. При этом тугоплавкими включениями, переносимыми потоком титана на максимальное расстояние от места попадания в промежуточную емкость, являются насыщенные примесями внедрения частицы  $\alpha$ -титана. Установленные в работе зависимости позволяют определить габариты промежуточной емкости, обеспечивающие гарантированное удаление тугоплавких включений из титана путем их осаждения.

1. Nitride inclusions in titanium ingots / J. L. Henry, S. D. Hill, J. L. Schaller, T. T. Campbell // Metal. Trans. — 1973. — № 4. — P. 1859–1864.
2. Кошелап А. В., Райченко А. И. О возможности измельчения структуры литого титана и его сплавов за счет их модифицирования частицами нитрида титана // Процессы литья. — 1999. — № 3. — С. 44–52.
3. Mitchel A. The production of high-quality materials by special process // J. Vac. Technol. — 1987. — № 4. — P. 2672–2677.
4. Мусатов М. И., Чукурюкин А. Д., Фридман А. М. Развитие плавки бездефектных слитков // Наука, производство и применение титана в условиях конверсии: I Междунар. науч.-техн. конф. по титану стран СНГ (Москва, май 1994 г.). — М.: ВИЛС, 1994. — Т.1. — С. 228–233.
5. Электронно-лучевая плавка титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. — Киев: Наук. думка, 2006. — 248 с.
6. Попель С. И., Сотников А. И., Бороненков В. Н. Теория металлургических процессов. — М.: Металлургия, 1986. — 462 с.
7. Bellot J. P., Mitchell A. Hard-Alfa particle behavior in a titanium alloy liquid pool // Light Metals. — 1994. — № 2. — P. 1187–1193.
8. Смитлз К. Дж. Металлы. Справочник. — М.: Металлургия, 1980. — 447 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
ООО «Стратегия БМ», Киев  
Поступила 30.06.2010