



УДК 669.187.526.001.57

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ТИГЛЯ ПРИ ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ГАРНИСАЖНОЙ ПЛАВКЕ

М. Л. Жадкевич, В. В. Тэлин, С. М. Теслевич,  
А. Б. Лесной, В. Ф. Демченко, В. А. Шаповалов

Проведено численное моделирование процессов теплообмена, протекающих в условиях вакуумно-дуговой гарнисажной плавки. Проанализирована зависимость максимального слива жидкого металла от геометрических параметров тигля.

Numerical modeling of heat exchange processes proceeding under the conditions of vacuum-arc skull melting was made. Dependence of maximum pouring out of molten metal on geometric parameters of crucible was analyzed.

**Ключевые слова:** вакуумно-дуговая гарнисажная плавка; численное моделирование; тепловые процессы; оптимизация геометрии тигля

Благодаря высокому уровню коррозионной стойкости титан и его сплавы находят все большее применение в химическом машиностроении для изготовления оборудования, эксплуатируемого в агрессивных средах (насосы для перекачивания кислот, трубопроводы, вентили и т. п.). Широкое распространение изделий из титана сдерживается их высокой ценой, обусловленной использованием для получения титановых заготовок вакуумно-дугового, электронно-лучевого или индукционного способов плавки [1–3], а также сложностью технологического процесса и потерями металла в ходековки и прокатки. Более прогрессивным процессом производства изделий из титана является литье. Для изготовления титановых отливок наиболее широко применяются вакуумно-дуговые литейные печи. В их первых конструкциях тигель изготовляли из графита. Из-за взаимодействия тигля с расплавленным титаном в последнем растворяется значительное количество углерода (до 19 % [4]), в результате чего ухудшаются пластические свойства отливок.

Несмотря на предпринимаемые меры по защите расплава от взаимодействия с тиглем путем наведения титанового гарнисажа, избежать загрязнения расплава углеродом не удастся вследствие его диффузии через гарнисаж. Поэтому в современной конструкции литейной печи «Нева» (рис. 1), установленной на Запорожском титано-магниевом комбинате, используют неохлаждаемый титановый тигель, на стенках которого в процессе плавки образуется гарнисаж, препятствующий их проплавлению.

Процесс плавки осуществляется таким образом. Расходуемый электрод 2 устанавливают по оси тигля 3. Заливочную камеру 4 стыкуют с плавильной камерой 1, герметизируют и вакуумируют плавильное пространство до остаточного давления газов 13...15 Па. Затем касанием электрода о дно тигля поджигают дугу и, поднимая электрод, растягивают ее на 30...40 мм. Рабочий ток плавки составляет 10 кА, напряжение на дуге 30...33 В. После сплавления электрода и кратковременной выдержки (для дегазации) жидкий металл сливают в металлическую форму.

Одной из важных задач технологии вакуумно-дуговой тигельной плавки является обеспечение условий, при которых достигается максимальный слив жидкого металла. Особое значение при этом имеет выбор геометрических размеров тигля. Определим при фиксированном объеме полости тигля влияние отношения  $\theta$  диаметра тигля  $D$  к его высоте

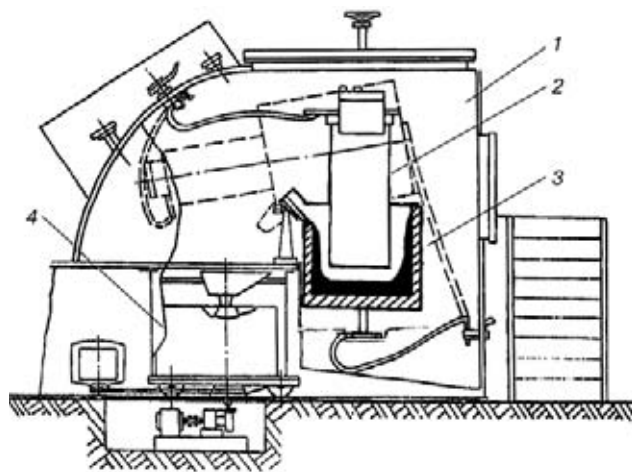


Рис. 1. Схема вакуумно-дуговой литейной печи (ВДЛП); обозначения поз. 1–4 см. в тексте

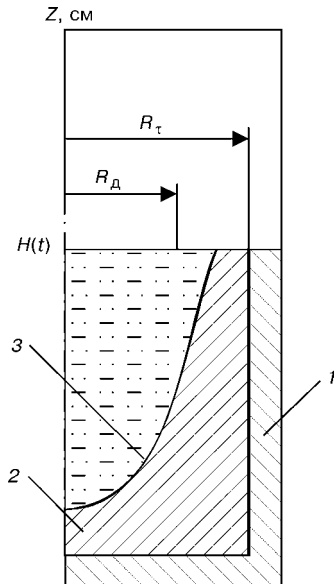


Рис. 2. Схема к математической модели вакуумно-дуговой гарнисажной плавки в цилиндрическом тигле: 1 — тигель; 2 — затвердевший гарнисаж; 3 — фронт затвердевания;  $R$  — внешний радиус тигля;  $R_\tau$  — внутренний радиус тигля;  $R_д$  — радиус теплового воздействия дуги под переплавляемым электродом;  $H(t)$  — уровень зеркала ванны

$H$  на массу жидкого металла, накапливаемого в тигле при его непрерывном заполнении жидким металлом к моменту завершения плавки.

Рассмотрим два крайних случая:  $\theta \gg 1$  и  $\theta \ll 1$ . В первом, из-за высоких потерь тепла через развитые донную и свободную поверхности объем жидкого металла будет минимальным. Аналогичный результат следует ожидать и для высокого тигля небольшого диаметра, поскольку обогрев головной части расплава окажется неэффективным, а потери тепла через боковую поверхность тигля будут значительными. Следовательно, существует такое значение  $\theta$ , при котором слив жидкого расплава будет максимальным, и оно зависит от способа и режима обогрева, конструкции тигля и других технологических параметров.

В условиях технологии вакуумно-дуговой гарнисажной плавки задачу оптимизации геометрических параметров тигля следует рассматривать с ограничениями, поскольку возможность варьирования диаметра тигля ограничена снизу диаметром расходоуемого электрода, причем таким образом, чтобы исключался переход дуги с поверхности зеркала ванны на стенку тигля.

В настоящей работе с помощью метода математического моделирования рассматривается задача оптимизации формы тигля при вакуумно-дуговой гарнисажной плавке.

При разработке математической модели предполагали осевую симметрию теплового поля, в связи с чем трехмерную задачу свели к решению двухмерной в цилиндрических координатах (рис. 2).

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H(t)} = \begin{cases} \varepsilon \sigma_0 (T^4 - T_0^4) + q_d(r) + m(r)c\rho (T - T_0) v_z(r, H(t)), & r \leq R_д; \\ \varepsilon \sigma_0 (T^4 - T_{в.к}^4), & R_д \leq r \leq R_\tau; \\ 0, & r > R_\tau, \end{cases} \quad (6)$$

Процесс переноса тепла с учетом выделения скрытой теплоты кристаллизации описывается следующим уравнением кондуктивного переноса энергии в энтальпийной форме:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \text{div}(\lambda(T) \nabla T), \quad (1)$$

где  $W = \int_{T_0}^T c\rho dT + \chi\rho\eta(T)$  — энтальпия;  $c$  — удельная теплоемкость;  $\rho$  — плотность материала;  $T$  — температура;  $\chi$  — скрытая теплота кристаллизации;  $\eta(T)$  — объемная доля жидкой фазы в интервале температур кристаллизации;  $t$  — время;  $\lambda(T)$  — эффективный коэффициент теплопроводности, приближенно учитывающий конвективную составляющую теплового потока в жидком металле.

$$\lambda(T) = \begin{cases} k \lambda_L, & T > T_S; \\ \lambda_S, & T \leq T_S, \end{cases} \quad (2)$$

где  $r, z$  — цилиндрические координаты.

Уравнение (1) интегрируется в двухмерной области  $\Omega = \{0 < r < R, 0 < z < H(t)\}$ ,  $t \in [0, t^*]$  (рис. 2). Уровень зеркала ванны  $H(t)$  рассчитывается в соответствии с заданной производительностью накопления жидкого металла.

Сформулируем граничные условия для уравнения (1). На оси тигля выполняются следующие условия симметрии теплового поля:

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0. \quad (3)$$

На боковой и донной поверхности тигля учитывается радиационный теплообмен со стенками вакуумной камеры по закону Стефана-Больцмана:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \varepsilon \sigma_0 (T^4 - T_{в.к}^4), \quad (4)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \varepsilon \sigma_0 (T^4 - T_{в.к}^4), \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент черноты поверхности;  $\sigma_0$  — постоянная Стефана-Больцмана;  $T_{в.к}$  — температура стенок вакуумной камеры.

На зеркале металлической ванны граничные условия формулируются следующим образом. В приэлектродной области ( $r \leq R_д$ ) учитываем радиационный теплообмен с оплавленным торцом расходоуемого электрода, тепловое воздействие дуги, а также теплообмен с каплями переплавляемого металла; в области, ограниченной внутренней стенкой тигля ( $R_д \leq r \leq R_\tau$ ), — радиационный теплообмен со стенками плавильной камеры; в боковой стенке тигля ( $r > R_\tau$ ) принимаем, что тепловой поток в вертикальном направлении отсутствует:

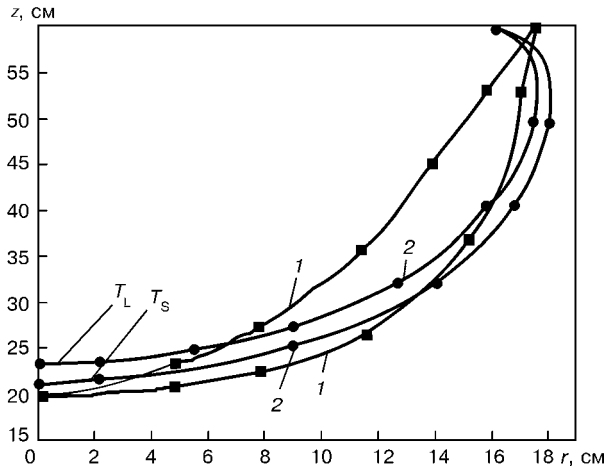


Рис. 3. Расчетная и экспериментальная конфигурация металлической ванны при вакуумно-дуговой гарнисажной плавке: 1 — экспериментальные; 2 — расчетные данные

где  $T_0$  — температура жидкого металла на оплавленном торце электрода;  $q_d(r)$  — плотность распределения тепловой мощности дуги;  $m(r)$  — поверхностная плотность поступления капель на зеркало ванны;  $v_z$  — скорость перемещения зеркала ванны.

В начальный момент времени  $t = 0$  предполагается существование затравочного объема металла с температурой  $T(0) = T_{в.к}$  и высотой  $H(0)$ , соответствующей толщине дна тигля.

Для численной реализации модели (1)–(6) использовали схему сквозного счета решения задачи типа Стефана [5], реализованную методом конечных разностей [6]. Расчеты проводили для титанового сплава ВТ1Л. Значения теплофизических характеристик титанового сплава [4] и типовые технологические параметры плавки, входящие в математическое описание модели ВДЛП, приняты такими:  $T_L = 1650^\circ\text{C}$ ,  $T_S = 1590^\circ\text{C}$ ;  $c_L = 0,5 \text{ Дж}/(\text{г}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $c_S = 0,7 \text{ Дж}/(\text{г}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $\chi = 436 \text{ Дж}/\text{г}$ ;  $\lambda_L = 0,3 \text{ Вт}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$ ,  $\lambda_S = 0,2 \text{ Вт}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$ ;  $\rho_L = 4,2 \text{ г}/\text{см}^3$ ,  $\rho_S = 4,5 \text{ г}/\text{см}^3$ ;  $R_d = 28 \text{ см}$ ;  $R_T = 49 \text{ см}$ ;  $T_0 = T_L + 50^\circ\text{C}$ ;  $T_{в.к} = 20^\circ\text{C}$ ;  $\epsilon = 0,6$ ; КПД дуги = 0,46; общая масса сплавляемого электрода 387 кг; толщина стенки тигля 4,5 см; толщина днища тигля 10 см;  $L, S$  — индексы, соответствующие жидкой и твердой фазам. Мощность источника нагрева равномерно распределялась на свободной поверхности ванны в пределах радиуса электрода.

Для верификации математической модели использовали экспериментальные данные о форме жидкометаллической ванны, полученные при плавке с характерными технологическими параметрами. На рис. 3 показаны экспериментальная форма ванны после слива жидкого металла из полости тигля, а также расчетные изолинии температур ликвидус и солидус. Приведенные графики свидетельствуют о достаточно удовлетворительном совпадении результатов расчетов с опытными данными.

Анализ динамики формирования жидкометаллической ванны в процессе плавки показал, что из двух факторов (скорость заполнения тигля расплавом и скорость затвердевания), от которых зависит количество жидкого металла в тигле, определяющее

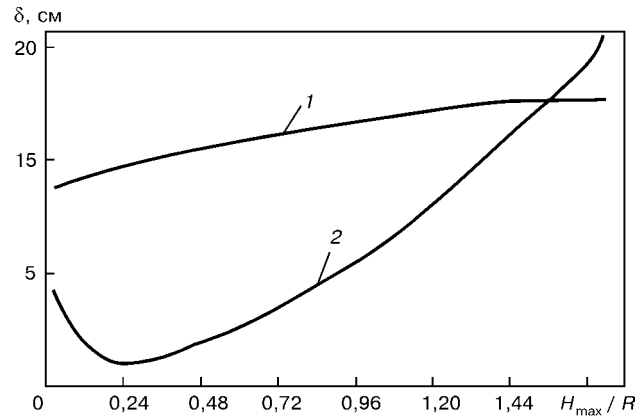


Рис. 4. Изменение минимальной толщины  $\delta$  гарнисажа по ходу плавки в осевом (1) и радиальном (2) направлениях;  $H_{\text{max}}$  — конечная высота переплавленного металла в тигле

значение имеет скорость заполнения. В ходе плавки толщина гарнисажа вблизи боковой стенки остается практически постоянной (рис. 4), в то время как в осевой части тигля зафиксировано колебание толщины гарнисажа.

На начальной стадии заполнения тигля происходит подплавление донной части гарнисажа, продолжающееся до достижения текущей высоты жидкого металла  $H(t) \sim 0,24R$ . При дальнейшем повышении уровня зеркала ванны теплоотвод с донной поверхности тигля доминирует над подводом тепла от источника дугового нагрева к межфазной границе, вследствие чего оплавление прекращается, и толщина гарнисажа увеличивается.

На рис. 5 представлены зависимости тепловых потерь с зеркала ванны, боковой и донной поверхностей тигля. На начальной стадии плавки максимальные тепловые потери характерны для зеркала ванны, минимальные — для боковой поверхности тигля.

По мере накопления жидкого металла в объеме тигля возрастают тепловые потери с боковой поверхности. При  $H(t) \sim 0,58R$  теплоотвод в стенку тигля начинает преобладать над теплоотводом с донной поверхности, а при  $H(t) \sim 0,94R$  — и над теплоотводом с поверхности зеркала ванны. К концу плавки тепловые потери с боковой поверхности тигля составляют 60 % суммарных тепловых. В связи с этим

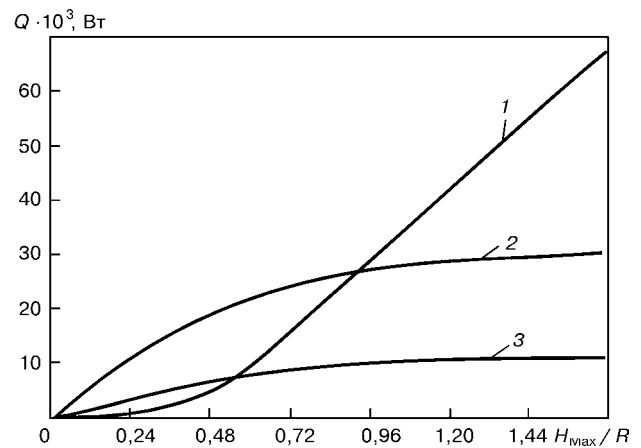


Рис. 5. Тепловые потери  $Q$  с боковой поверхности (1), зеркала ванны (2) и дна тигля (3)

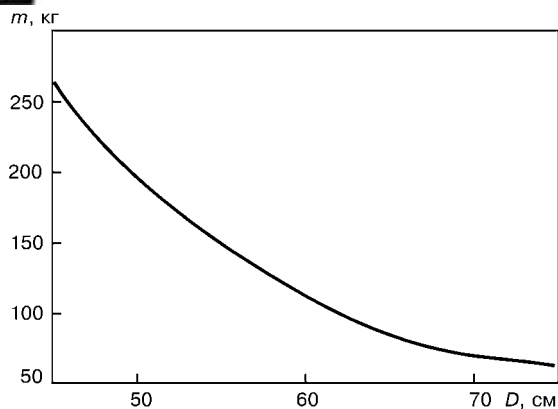


Рис. 6. Зависимость массы  $m$  жидкого металла от диаметра  $D$  тигля

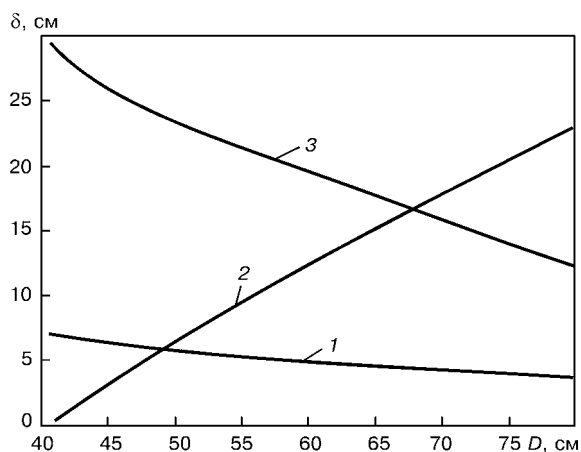


Рис. 7. Минимальная толщина гарнисажа на донной (1) и боковой (2) стенках тигля в зависимости от диаметра тигля, а также на дне тигля к концу плавки (3)

представляет интерес оценить энергетическую эффективность процесса ВДЛП в зависимости от геометрии тигля.

На рис. 6 показана зависимость накопленной массы жидкого металла на конечной стадии плавки от диаметра тигля при постоянном объеме переплавляемого материала, мощности и производительности плавки. Общая тенденция такова: с уменьшением диаметра тигля масса жидкого металла к моменту слива увеличивается.

Данный результат обуславливается несколькими факторами: прежде всего довольно высокой производительностью плавки и относительно низкой теплопроводностью титана в затвердевшем состо-

янии, а также тем обстоятельством, что с уменьшением диаметра тигля возрастает коэффициент его заполнения ( $R_d/R_T$ ), вследствие чего снижаются тепловые потери с поверхности зеркала ванны и повышается перегрев жидкого металла над температурой ликвидус. Дальнейшее уменьшение диаметра тигля приводит к подплавлению боковой стенки. Таким образом, при оптимизации геометрических размеров тигля потенциально возможный экстремум не достигается, поскольку вступает в силу ограничение на диаметр тигля, связанное с проплавлением боковой стенки.

Из рис. 7 следует, что для донной поверхности близкая к критической степень оплавления не зафиксирована, в то время как минимальная толщина боковой стенки тигля при диаметрах менее 45 см значительно снижается, а это может привести к прожогу.

### Выводы

1. Показано, что тепловые потери с боковой поверхности тигля в условиях вакуумной дуговой гарнисажной плавки могут достигать 60 % суммарных. Поэтому минимизация высоты тигля способствует повышению теплового КПД процесса.

2. Установлено, что в условиях нестационарного процесса накопления жидкого металла его максимальный слив достигается при внутреннем диаметре тигля, равном 0,65 высоты.

1. Плавка и литье титановых сплавов / А. Л. Андреев, Н. Ф. Аношкин, К. М. Борзецовская и др. — М.: Металлургия, 1978. — 383 с.
2. Электронно-лучевая плавка / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 265 с.
3. Калинюк А. Н. Развитие электронно-лучевой плавки титана и его сплавов // Спец. электрометаллургия вчера, сегодня, завтра: Материалы междунар. науч.-техн. конф. (Киев, 8–9 окт. 2002 г.). — Киев: Политехника, 2002. — С. 102–108.
4. Титановые сплавы. Производство фасонных отливок из титановых сплавов / Е. Л. Бибииков, С. Г. Глазунов, А. А. Неуструев и др. — М.: Металлургия, 1983. — 296 с.
5. Николаев Е. С., Самарский А. А. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1978. — 537 с.
6. Самарский А. А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1977. — 656 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
КП «Запорожский титано-магниевого комбинат»  
Поступила 27.05.2005