

2. А. с. 933196 СССР, МКИ³ В22Д 11/00. Способ непрерывной разливки металла / А. С. Корниенко, Н. В. Леушин, О. В. Носоченко и др. - Опубл. 07.06.83, Бюл. № 12.
3. Мочалов О. О. Курс фізики: Навчальний посібник для вузів. — Миколаїв: НУК, 2008. — Т. 2. — 384 с.
4. Коваль С. С., Коваль С. В., Кучер Д. Ю. Моделирование процессов распределения инакулаторов в объеме слитка при непрерывной разливке: Тез. докл. // VI Міжнародна наукова школа-семінар по імпульсним процесам, в механіці суцільних середовищ. — Миколаїв, 2005. — С. 123-126.
5. Мочалов А. А., Шаповал Н. А. Математическая модель намораживания металла на микрохолодильник // Математичне моделювання. — 2009. - № 3. — С. 78-80.
6. Мочалов А. А., Гайша А. А., Шаповал Н. А. Математическая модель физических процессов кристаллизации слитков и сварных швов при наличии микрохолодильников // УГМТУ. — 2008. — № 6 (423). — С. 76-80.
7. Парселл П. Э. Берклеевский курс физики. Электричество и магнетизм. - М.: Наука, 1975. — С. 349-362.
8. Проблемы теплообмена: Пер. с англ. / Под ред. П. Л. Кириллова. — М.: Атомиздат, 1967. - 336 с.

Поступила 12.09.2009

УДК 621.746.516

В. А. Середенко, Е. В. Середенко

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ ШАРОВ В ЖИДКУЮ СРЕДУ

Методом физического моделирования на основе термогидродинамических критериев подобия и безразмерных соотношений изучен процесс литья шарообразных тел в охлаждающую несмешивающуюся жидкость. Проанализировано влияние ряда параметров, зависящих от температуры, на характер внедрения расплавленного объема в жидкую среду и его перемещения в ней, формообразование и сфероидизацию отливаемого тела. Определены рациональные условия проведения процесса литья, обеспечивающие его эффективность.

Методом фізичного моделювання на основі термогідродинамічних критеріїв та безрозмірних співвідношень вивчений процес лиття кулеподібних тіл у охолоджувальну рідину, що не змішується. Проаналізовано вплив ряду параметрів, які залежать від температури, на характер впровадження розплавленого об'єму у рідке середовище і його переміщення в ній, формоутворення і сфероїдизацію тіла, що відливається. Визначені раціональні умови проведення процесу лиття, які забезпечують його ефективність.

On a base of the termohydrodynamic Numbers and undimension correlations spherical bodies casting process into the cooling immiscible liquid was studied by physical simulation method. It was analyzed a series of parameters action, depending on temperature, on introducing character of melted volume into the liquid medium and its displacement in the it, forming and sphere shaping of the casted bodies. Rational conditions leading of casting process allow to provide it efficacy were determined.

Ключевые слова: моделирование, литье, шар, охлаждающий расплав.

Процесс литья металлических шаров в несмешивающемся расплаве зависит от многих факторов (тепловых, гидродинамических, поверхностных и других) и еще недостаточно изучен [1-4]. Образование шара в жидкой среде сопровождается изменением межфазной поверхности несмешивающихся неизотермических жидкостей и колебаниями ее формы. Процесс формирования сферической межфазной поверхности усложняет то, что он протекает в нестационарных условиях теплообмена на локальных участках охлаждающегося и затвердевающего объема, внедренного в менее нагретый расплав.

Формирование в жидкой охлаждающей среде тел со сферической поверхностью применяется при изготовлении из сплава Sn-Pb моноразмерных шариков ($D = 0,7 \div 0,8$ мм) в силиконовом масле (соотношение плотностей отливки и среды $K_p \gg 1$) для микроэлектроники [1], утилизации отходов магниевых производств (шарики магния с D до 2 мм) в оксидно-солевом расплаве $K_p \approx 1$ [2], получения крупных гранул магния (с $D = 5 \div 15$ мм) в солевом расплаве ($K_p > 1$) для производства полиэтиленсиликоновых жидкостей [3]. В солевом расплаве отлиты также шары из алюминия диаметром до 40 мм ($K_p \approx 1$) [4]. Основной трудностью обеспечения стабильных результатов по форме шаров при их литье в жидкую среду, близкую им по плотности, вследствие быстрого изменения плотности вещества шара при охлаждении и затвердевании является выбор диапазона вариации K_p в процессе формирования сферической поверхности шара [1, 3, 4].

К данному способу изготовления шарообразных тел примыкают технологии получения металлической дроби, в которых сфероидизация дискретных объемов происходит в газовой среде, а затвердевание - в жидкой ($K_p \gg 1$) [5]. Использование газовой среды для формирования литых тел с идеальной сферической поверхностью в условиях невесомости предусматривается в космической технологии [6]. Однако, проведенные эксперименты не дали однозначных результатов. Опыты со сплавом Вуда на космической станции привели к получению чечевице- и грушеобразных отливок, а из меди отлит шар диаметром 0,15 м [6, 7]. В общем для процесса литья шарообразных тел в жидкой среде характерно наличие определенной части отливок нестандартной формы (сплюснутые, грушеобразные, гантели, с впадинами или хвостами и т. п.), особенно при увеличении их размера [3]. Причиной этого, в первую очередь, является неоптимальное сочетание во времени гидродинамических и теплофизических процессов.

Особенности указанных процессов исследовались с использованием модельных сред при внедрении струи расплава, истекающего из мерной емкости, через свободную поверхность в охлаждающую среду, формообразовании отливки и ее перемещении в среде, охлаждении и затвердевании шара. Материалом отливок служили сплавы парафина и пластилина, а вода и водный раствор хлористого натрия использовались как охладители. Охлаждающие среды были прозрачны, что давало возможность наблюдать за процессом формообразования и перемещения шаров. Характеристики модельных веществ приведены в таблице [8-10]. Значение коэффициента межфазного натяжения жидкостей σ_{12} определялось из уравнения, выведенного в [11], по формуле

$$\sigma_{12} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_2^2 - 2\sigma_1\sigma_2 \cos \theta_k},$$

где σ_1 – коэффициент поверхностного натяжения жидкого сплава, Н/м; σ_2 – коэффициент поверхностного натяжения охлаждающей среды, Н/м; θ_k – краевой угол при контакте двух несмешивающихся жидкостей (сплава и среды) и газа, град.

Краевой угол θ_k устанавливался по форме затвердевшей капли сплава на поверхности охлаждающей жидкости и для исследованных сред составил $\sim 19^\circ$. При этом коэффициент межфазного натяжения по расчету имел значение $\sim 0,034$ Н/м. Число Нуссельта (Nu) при движении шарообразного объема в охлаждающей жидкости определялось по формулам [12]

$$Nu = 2 + 0,08 Re^{2/3} Pr^{1/3} \quad \text{при } Re < 200;$$

$$Nu = 0,55 Re^{0,5} Pr^{0,35} \quad \text{при } Re < 200,$$

где Re – число Рейнольдса в охлаждающей жидкости, окружающей движущийся шарообразный объем; Pr – число Прандтля охладителя.

Коэффициент теплоотдачи α определялся по выражению [12] $\alpha = Nu \lambda_2 / l_1$, где λ_2 – коэффициент теплопроводности охлаждающей жидкости, Вт/(м · °С); l_1 – характерный размер жидкого дискретного объема сплава, м.

Эксперименты проводились при изменении характерных размеров отливаемых тел

и чисел подобия в следующих диапазонах: а - сплав № 1 + среда № 1 диаметр шаров D_1 [0,005-0,014 м]; Pr [3,54-6,99]; Re [38-1018]; Nu [2,2-14,5]; число Фруда Fr [1,6-5,5]; число Вебера We [1,2-13,2], температура перегрева сплава t_1 , отнесенная к температуре его плавления $t_{пл}$ [1,036-1,248], температура охлаждающей среды t_2 , отнесенная к температуре $t_{пл}$ [0,288-0,998]; б - сплав № 2 + среда № 2 - D_1 [0,01-0,02 м], Pr [3,54-6,99]; Re [189-1026]; Nu [6-28], Fr [1,6-5,5]; We [1,2-13,2]; $t_1/t_{пл}$ [1,036-1,248]; $t_2/t_{пл}$ [0,288-0,998]. При этом в варианте “а” реализовался процесс литья менее плотного, чем среда жидкого сплава ($K_p=0,96$), но который в процессе охлаждения и затвердевания сравнивался по плотности со средой ($K_p=1$) и при дальнейшем охлаждении превосходил ее по плотности ($K_p=1,10$). В варианте “б” плотности жидкого сплава и охлаждающей среды в начале взаимодействия были равны ($K_p=1$), а при охлаждении сплава его плотность превышала плотность среды ($K_p=1,17$). Такой выбор вариантов изменения K_p в процессе литья обусловлен условием создания состояния “квазиневесомости” объема сплава при протекании процесса его сфероидизации. Для фиксации промежуточных форм жидкого объема сплава в процессе образования шарообразных тел применялся метод “замораживания” сплава. Это реализовалось за счет подбора температур t_1 и t_2 .

В процессе проведения опытов определили, что в момент соприкосновения лобовой части жидкого объема сплава с охлаждающей жидкостью ее поверхность прогибалась. Искривление этой поверхности создавало капиллярное давление, которое стремилось вернуть ее в горизонтальное положение. В результате лобовая часть падающего объема сплава затормаживалась и возникало ее растекание по прогнутой поверхности охладителя. При

Характеристики модельных веществ отливок и охлаждающих сред

Вещества	Плотность, кг/м ³	Температура плавления, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Коэффициент кинематической вязкости, м ² /с	Коэффициент поверхностного натяжения, Н/м
Отливка	сплав № 1: 50 % пластилина 50 % парафина	52,1*	0,49*	-	0,023
	сплав № 2: 80 % пластилина 20 % парафина	52,1*	0,49*	-	0,023*
Охлаждающие среды	среда № 1: вода	0	0,60 при 20 °С 0,65 при 50 °С	1,006 · 10 ⁻⁶ при 20 °С 0,556 · 10 ⁻⁶ при 50 °С	0,073 при 20 °С 0,068 при 50 °С
	среда № 2: 20 % раствора NaCl в воде	< 0	0,65 при 50 °С	0,556 · 10 ⁻⁶ при 50 °С	0,068 при 50 °С

* определено экспериментально

внедрении сплавов в охлаждающую среду со скоростью в момент контакта v_k до 0,4 м/с ($Fr < 1,7$) они не прорывались в объем охладителя и отливки оставались на его поверхности, удерживаемые силой межфазного натяжения. Литое тело в этом случае имело форму диска с толщиной, возраставшей в направлении его центра. Увеличение кинетической энергии объема жидкого сплава ($v_k > 0,42$ м/с, $Fr > 1,8$) приводило к резкому прогибу центра искривленной поверхности охладителя и проникновению части объема сплава в объем охлаждающей жидкости со скоростью v_o до 0,01 м/с ($Re < 200$; $Nu < 7$). При этом поверхностные силы были в состоянии удерживать объем сплава у поверхности охлаж-



Рис. 1. Отливки, оставшиеся у поверхности охладителя, $Fr = 1,9$

приводило к прорыву всего объема сплава под уровень охлаждающей жидкости ($Re < 200$; $Nu < 11$). При этом формирование отливки шло по схеме преобразования лобовой части объема в крупный фрагмент оболочки будущего шара, к которой примыкала кормовая часть объема в виде разнотолщинного изогнутого удлиненного образования (“хвоста”),

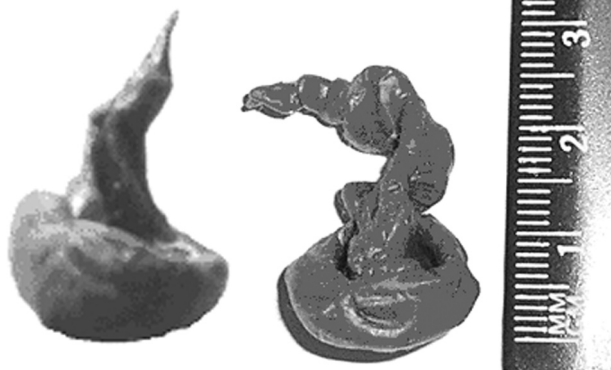


Рис. 2. Формы отливок при скорости внедрения в охладитель $\sim 0,5$ м/с, ($Fr = 2,5$)

в которую втекала одной или двумя струями кормовая часть объема, рис. 4. В процессе поглощения шарообразной частью объема сплава кормового объема ее диаметр рос, она замедляла свое движение и кормовой объем преобразовывался в конический выступ на поверхности сфероидизирующегося объема, рис. 5. Втекавшая в жидкий шар масса кормового объема приводила к образованию впадины в зоне ее поглощения и выпучиванию противоположной части поверхности шара, рис. 6. Затем начинался процесс колебания (осцилляции) поверхности жидкого шара,



Рис. 3. Форма отливки после стягивания “хвоста” ($Fr = 2,5$)



Рис. 4. Форма отливок при втекании кормовой части объема сплава в сфероидизирующийся объем сплава ($Fr > 2,5$)

дающей жидкости. Однако, значительная его часть сфероидизировалась под уровнем охладителя и сохраняла связь с остальным объемом сплава, оставшемся у поверхности охлаждающей жидкости, рис. 1. Затем жидкий сплав делился на два объема. Один оставался в виде диска на поверхности охладителя, а второй сфероидизировался в объеме охлаждающей среды.

Увеличение скорости внедрения сплавов в охладитель до $0,5$ м/с ($Fr \approx 2,6$)

приводило к прорыву всего объема сплава под уровень охлаждающей жидкости ($Re < 200$; $Nu < 11$). При этом формирование отливки шло по схеме преобразования лобовой части объема в крупный фрагмент оболочки будущего шара, к которой примыкала кормовая часть объема в виде разнотолщинного изогнутого удлиненного образования (“хвоста”), рис. 2. Затем кормовая часть объема сплава складывалась внутри оболочки лобовой части (рис. 3) и далее происходила сфероидизация всего объема сплава.

При скорости лобовой части объема сплава в момент касания поверхности охлаждающей жидкости, превышающей $0,5$ м/с ($Fr > 2,6$), искривление поверхности охладителя и прорыв лобового объема под его уровень происходили без развития процесса растекания жидкости лобового объема сплава ($Re < 200$; $Nu < 12$). Эта часть объема приобретала шарообразную форму,

который заканчивался через определенное (в условиях эксперимента $< 0,5$ с) время, вследствие действия сил вязкости. Шары образовывались в жидкой среде до скорости внедрения жидкого сплава в охладитель $v_k \approx 0,85$ м/с ($Fr < 8$) и при скорости объема сплава в охладителе до $v_0 \approx 0,1$ м/с ($We < 6$), рис. 7. Превышение этой скорости приводило к деформации и разрушению объема сплава с последующим возникновением нескольких шариков различного диаметра ($We \approx 10$).

Исследования показали, что в варианте “а”, когда жидкий сплав имел меньшую плотность, чем среда, после образования сферической поверхности объема сплава и начала его охлаждения с недостаточной интенсивностью ($Nu < 5$), он всплывал на поверхность охладителя жидким или полутвердым. При этом шар либо растекался в утолщенный диск, либо образовывал полусферы или кувшино- и шляпообразные отливки, рис. 8. При изменении K_p по рассмотренным вариантам глубина ванны с охлаждающей средой должна обеспечивать касание ее дна или свободной поверхности охладителя не деформируемой отливкой. При этом необходимо выполнение следующих условий: $\tau_{сф} < \tau_0 < \tau_n$, где $\tau_{сф}$ – время сфероидизации жидкого объема сплава; τ_0 – время охлаждения до затвердевания шара; τ_n – время перемещения объема сплава в жидком охладителе до момента касания его границы с ванной или атмосферой.

Время сфероидизации жидких объемов сплавов при проведении экспериментов коррелировало (ошибка $< 20\%$) со временем, определенным по формуле $\tau_{сф} \approx \sqrt{\rho_1 D_1 / \sigma_1}$, предложенной для оценки в первом приближении времени сфероидизации жидкости в газовой среде в условиях невесомости [6]. В частности, для шариков диаметром $0,020$ м экспериментально установленное $\tau_{сф} \leq 0,6$ с (расчетное время сфероидизации $0,51$ с). Средняя скорость жидких объемов сплавов после контакта с поверхностью жидкости и погружения в охладитель v_0 была примерно на порядок меньше v_k . Для варианта “а” она определялась по глубине и времени погружения объема сплава до момента остановки и всплывания сплава в охладителе. В варианте “б” этот момент соответствовал резкому торможению объема при погружении в охлаждающую среду. Затем наступал период ускоренного погружения затвердевшего сплава. Причем, в начале этого периода шарики двигались прямолинейно, а через $1,0-1,5$ с они начинали двигаться по зигзагообразной траектории, что соответствовало движению одиночных пузырей в жидкости с вероятностным характером [3]. Зафиксированная осредненная скорость v_1 погружения шаров зависела от их диаметра и степени нарастания разности плотностей сплава и охладителя. Так, для варианта “б” при температуре охладителя 50 °С и диаметре шара $0,015$ м она составляла $0,08$ м/с.

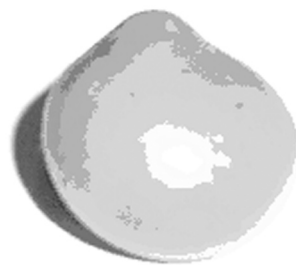


Рис. 5. Форма отливки на завершающей стадии поглощения втекающей кормовой части объема ($Fr > 2,5$)



Рис. 6. Отливка с впадиной после поглощения кормовой части объема сплава

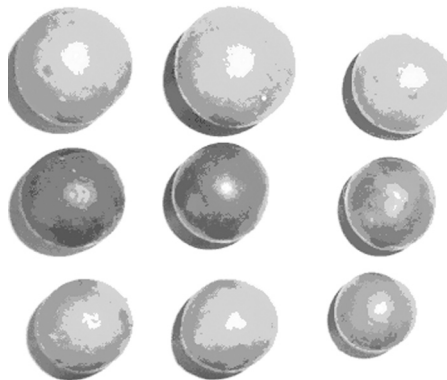


Рис. 7. Шары из модельных сплавов, полученные при $2,5 < Fr < 8,0$ и $We < 6,0$

Время охлаждения объема жидкого сплава до температуры его затвердевания можно оценить по выражению

$$\tau_0 = \frac{Q}{\Phi} = \frac{c_1 \rho_1 V_1 (t_1 - t_{1пл})}{\alpha S_1 (t_1 - t_2)} = \frac{c_1 \rho_1}{\alpha} \cdot \frac{V_1}{S_1} \cdot \theta = \frac{c_1 \rho_1}{\lambda_2} \cdot \frac{1}{Nu} \cdot \left(\frac{V_1}{S_1}\right)^2 \cdot \theta = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 \cdot a_1} \cdot \frac{1}{Nu} \cdot \left(\frac{V_1}{S_1}\right)^2 \cdot \theta = \frac{K_\lambda}{Nu} \cdot \left(\frac{V_1}{S_1}\right)^2 \cdot \theta,$$



Рис. 8. Отливки, полученные в условиях $K_p < 1$, $Nu < 5$, $We < 3$, $t_1 - t_2 > 15^\circ C$

где Q – количество теплоты, полученной жидким сплавом после его расплавления при перегреве до t_1 , Дж; Φ – тепловой поток с поверхности сплава в охладитель, Вт; c_1 – удельная теплоемкость жидкого сплава, Дж/(кг × °град); V_1 – объем жидкого сплава, м³; S_1 – поверхность объема жидкого сплава, м²; V_1/S_1 – характерный размер жидкого

сплава, м; $\theta = \frac{t_1 - t_{1пл}}{t_1 - t_2} = \left(\frac{t_1}{t_{1пл}} - 1\right) / \left(\frac{t_1}{t_{1пл}} - \frac{t_2}{t_{1пл}}\right)$ – безразмерный параметр, характеризующий отношение температуры перегрева к температурному напору при остывании жидкого сплава в охладителе; $K_\lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ – соотношение коэффициентов теплопроводностей жидкого сплава и охлаждающей среды; $a_1 = \frac{\lambda_1}{c_1 \cdot \rho_1}$ – коэффициент температуропроводности жидкого сплава, м²/с; ρ_1 – плотность жидкого сплава, кг/м³.

Как показали результаты моделирования, для получения шаров со стабильной сферической поверхностью время τ_0 должно значительно превышать время сфероидизации $\tau_{сф}$. В частности, для шаров с диаметром 0,010 м $\tau_0 / \tau_{сф} \approx 7$, а при $D_1 = 0,020$ м $\tau_0 / \tau_{сф} \approx 10$. При условии $\tau_0 / \tau_{сф} \gg 1$ ускоренным охлаждением отдельных частей объема сплава из-за повышенной поверхности теплоотдачи на начальной стадии теплового взаимодействия жидкого сплава и охладителя можно пренебречь. В этом случае допустимо принять, что основное теплосодержание жидкого сплава снимается в охлаждающей среде после его сфероидизации и $V_1/S_1 \approx D_1/6$. При этих допущениях соотношение $\tau_0 / \tau_{сф} = K_\tau$ имеет вид

$$K_\tau = \frac{K_\lambda}{Nu} \cdot \frac{\theta}{a_1} \cdot \left(\frac{V_1}{S_1}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{12}}{\rho_1 D_1^3}} = \frac{K_\lambda \theta}{Nu} \cdot \frac{\sqrt{\sigma_{12}} \sqrt{D_1}}{a_1^2 \rho_1 \cdot 36} = \frac{K_\lambda}{\sqrt{K_p}} \cdot \frac{\theta}{Nu} \cdot \frac{\sqrt{\sigma_{12} \rho_2}}{a_1^2} \cdot \frac{\sqrt{D_1}}{36}.$$

Максимальные значения K_τ ограничены рациональной глубиной h ванны охладителя, так как $h = v_1 \cdot \tau_0$. Минимизации h способствует близость K_p к 1 в период затвердевания, что снижает значение v_1 . Поэтому вариант “а” хоть и сложнее обеспечить на начальном этапе, но он имеет преимущество перед вариантом “б” при конструировании компактного устройства и минимизации объема охладителя. В обоих исследованных вариантах изменение значения K_p в процессе получения шаров предпочтительно в интервале $0,96 \leq K_p \leq 1,10$. Для предотвращения преждевременного загустевания поверхностных слоев сфероидизирующегося жидкого сплава на начальной стадии теплового взаимодействия с охлаждающей средой K_λ должно быть больше 1. Уменьшению K_τ способствует увеличение числа Nu . Однако, процессы отрыва пограничного слоя и формирования в охладителе кормовой вихревой зоны деформируют кормовую часть объема жидкого сплава. Эти процессы, как известно [13], возникают при обтекании круглых тел при числе $Re > 65$ и активно развиваются при $Re > 200$, что ограничивает число Nu . Как показало проведенное моделирование, число Nu не должно превышать величины, равной 10.

Комплекс $\sqrt{\sigma_{12}\rho_2/a_1^2}$ для определенных пар “жидкий сплав-охладитель” величина постоянная, как и числовой коэффициент $1/36$. Увеличивается K_τ пропорционально росту диаметра шара в степени 0,5. Управлять величиной K_τ позволяет соотношение θ , график изменения которого в безразмерных координатах представлен на рис. 9. Использование больших перегревов ($t_1/t_{\text{пл}} > 1,30$) энергетически не рационально и может вести к существенному окислению жидких сплавов. Для обеспечения жидкотекучести расплавленных сплавов при заливке в охладитель их минимальный перегрев должен быть на уровне $t_1/t_{\text{пл}} \geq 1,01$. Таким образом, реальный диапазон изменения температуры сплавов перед заливкой $1,01 \leq t_1/t_{\text{пл}} \leq 1,30$. Малые значения $t_2/t_{\text{пл}}$, как правило, нереализуемы из-за достаточно

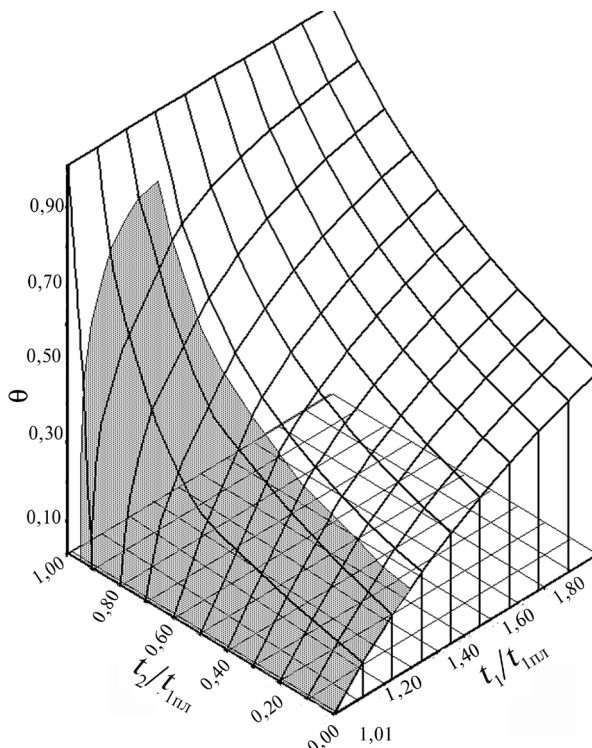


Рис. 9. Зависимость θ (соотношение температуры перегрева сплава над температурой плавления с температурным перепадом между сплавом и охладителем) от безразмерных температуры перегрева ($t_1/t_{\text{пл}}$) и температуры охладителя ($t_2/t_{\text{пл}}$)

высоких температур плавления охлаждающих расплавов. Например, для пары «жидкая сталь – расплав олова», которые имеют область не-смешивания в жидком состоянии и близки по плотностям, $t_2/t_{\text{пл}} \geq 0,15$. Высокие ($> 0,95$) значения $t_2/t_{\text{пл}}$ могут привести к существенному огрублению структуры отливок, а также интенсифицировать его окисление, если охладитель металлическая жидкость. Поэтому $0,15 \leq t_2/t_{\text{пл}} \leq 0,95$. С учетом изложенного, интервал реализуемых на практике значений θ составляет $[0,01-0,72]$ (рис. 9 – затемненная область). Такой интервал варьирования θ дает возможность в весьма широких пределах реализовать рациональные значения K_τ .

Полученные результаты были проверены при получении шаров диаметром 0,017-0,025 м из алюминиевого сплава в расплаве хлористого цинка ($Pr_2 = 2$; $K_\lambda = 188$; $\sigma_{12} \approx 0,36$ Н/м). Использовали вариант “а”. Значение K_p при внедрении в охладитель составляло 0,98, а при затвердевании - 1,10. Температура сплава перед заливкой ($t_{\text{пл}} = 655$ °С) варьировалась в пределах 665-680 °С ($1,02 \leq t_1/t_{\text{пл}} \leq 1,04$). Расплав хлористого цинка имел температуру 370-490 °С ($0,57 \leq t_2/t_{\text{пл}} \leq 0,75$). Это обеспечило значение θ в диапазоне 0,034-0,132. Объемы алюминиевого сплава, вводимые в охладитель с малой скоростью ($Fr < 1,7$), не проникали в объем расплавленной соли. Они кристаллизовались у поверхности охладителя в виде сфер с хвостами. Увеличение скорости внедрения сплава ($Fr > 1,8$) в солевой расплав в согласии с результатами моделирования привело к преодолению силы поверхностного натяжения охладителя и обеспечило внедрение в его объем жидкого алюминиевого сплава. Выполнение условий, определенных при физическом моделировании для системы “алюминиевый сплав – расплав хлористого цинка” ($1,8 \leq Fr < 2,0$; $v_0 \leq 0,01$ м/с; $Re \leq 15$; $We < 0,02$; $2,1 \leq Nu \leq 2,6$; $K_\tau \geq 160$), позволило получить отливки со сферической поверхностью. Вследствие низкой теплопроводности охладителя (0,5 Вт/(м · К)) и высоких значений как теплоемкости (1090 Дж/(кг · К)), так и теплоты кристаллизации ($3,86 \cdot 10^5$ Дж/кг) алюминиевого сплава, время формирования и затвердевания шаров в солевом расплаве достигло 530 с ($D_1=0,025$ м). Эти факторы способствовали повышению значений K_τ , которые были снижены за счет малых величин θ . Установлено, что в возникавшей при заливке протяженной кормовой части (“хвосте”) объема сплава концентрировались оксиды вследствие

смещения при внедрении в охладитель оксидной пленки с лобовой части его объема. Поэтому часть объема шара, в которую втек металл “хвоста”, была загрязнена оксидами больше, чем другие зоны отливки. В указанной части объема шара, как и в его центре, зафиксированы мелкие поры.

Таким образом, процессом литья шаров в жидкий охладитель можно управлять как за счет подбора пар «шар-охладитель» с соответствующими физическими характеристиками (ρ , σ , λ , α , c), так и воздействием на гидродинамические (Fr , We , Re) и теплофизические (θ , Nu) параметры процесса. Дополнительные возможности в регулировании такого процесса литья могут предоставить адекватно организованные внешние воздействия.

В частности, результаты проведенных исследований были использованы при разработке процесса литья шарообразных и плоских тел в жидкометаллическую охлаждающую среду с применением дифференцированных электромагнитных воздействий на отливаемый металл и жидкий охладитель [14].



Список литературы

1. *Yin Pyongwon, Chun Jung – Hoon, Ando-Teiichi, Sikka Viond K.* Production and characterization of mono-sized Sn-Pb alloys balls // *Int. J. Powder Met.* – 1996. – V. 32, № 2. – P. 155-164.
2. *Кулинский А. И.* Устойчивость капель металла в оксидно-солевых расплавах // *Расплавы.* – 1993. – № 2. – С. 83-85.
3. *Кулинский А. И., Агалаков В. В.* Получение крупных сферических гранул магнезия методом диспергирования жидкого металла в солевом расплаве // *Цв. металлы.* – 1999. – № 5. – С. 76-77.
4. *Козенко А. В.* Отливка шаров в жидких средах при наложении магнитного поля // *Прикладная магнитная гидродинамика.* – Киев: Гос. изд-во техн. лит. УССР, 1963. – С. 84-89.
5. *Затуловский С. С., Мудрук Л. А.* Получение и применение металлической дробы. – М.: Металлургия, 1988. – 183 с.
6. *Беляков Н. Т., Борисов Ю. Д.* Основы космической технологии. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с.
7. *Венецкий С. И.* О редких и рассеянных. Рассказы о металлах. – М.: Металлургия, 1981. – 184 с.
8. *Кузнецов Н. И.* Международная система единиц (СИ). – Минск: Высш. шк., 1965. – 94 с.
9. *Гречко А. В., Нестеренко Р. Д., Кудинов Ю. А.* Практика физического моделирования на металлургическом заводе. – М.: Металлургия, 1976. – 224 с.
10. *Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукмел А. С.* Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
11. *Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В.* Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия, 1976. – 232 с.
12. *Меджибожский М. Я.* Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. – Киев; Донецк: Вища шк., 1979. – 280 с.
13. *Кутателадзе С. С.* Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
14. *Dubodelov V. I., Seredenko V. A., Seredenko E. V.* Casting formation by electromagnetic controlling in the liquid metal coolant // *Magnetohydrodynamics.* – 2003. – Vol. 39, № 4. – P. 389-394.

Поступила 19.05.2009