

Введение. Закалка из жидкого состояния сопровождается изменениями фазового состава и микроструктуры сплавов, которые способствуют формированию комплекса уникальных свойств [1-6]. Степень метастабильности структуры быстрозакаленных сплавов повышается с ростом скорости охлаждения расплава v , что определяет ключевую роль этого параметра в процессах структурообразования. Величина v может быть определена прямыми и косвенными экспериментальными методами, а также теоретическим анализом уравнений теплопроводности.

Прямые методы измерения v [7-10] не обеспечивают достаточной точности и воспроизводимости результатов измерений, вследствие чего экспериментальные значения v нужно принимать только как оценочные. Недостатком косвенных методов [11-13] является то, что все они носят частный характер и могут применяться только для сплавов с определенными типами микроструктур, а при получении аморфных структур данные методы становятся вовсе непригодными. В связи с этим наиболее широкое распространение получили методы теоретического расчета скорости быстрой закалки [1, 14-16], основанные на численном решении задачи о передаче тепла между тонким слоем расплавленного металла и полубесконечной подложкой.

В настоящей работе представлена оригинальная математическая модель процессов теплопереноса, развивающихся в условиях кокильного литья, с помощью которой изучены термические режимы получения металлических отливок. Для адаптации тепловой задачи к реальным условиям производства массивных металлических стекол (ММС) предложен модифицированный подход, в котором рассматривается схема двустороннего теплоотвода из расплава в стенки металлической изложницы конечной толщины. В этом отношении разработанная модель отличается от выполненных ранее расчетных работ [1, 14-16], основанных на физически менее строгом предположении о полубесконечном теплоприемнике.

Модельные исследования динамики охлаждения кокильных отливок выполнены для многокомпонентных объемно-стеклующихся сплавов Vit 1 – $Zr_{41,2}Ti_{13,8}Cu_{12,5}Ni_{10}Be_{22,5}$ и Vit 101 – $Cu_{47}Ni_8Ti_{34}Zr_{11}$ с известными экспериментальными значениями критической скорости охлаждения и сечения отливка, при которых фиксируются аморфные структуры.

Постановка задачи. При постановке задачи о передаче тепла между слоем расплава и холодильником исходили из следующих физических допущений. Полагали, что расплав заливают в металлическую изложницу, предназначенную для получения плоскопараллельных отливок, толщина которых ($2l_1$) существенно меньше двух других характерных размеров (рис. 1). Слой расплава во всем объеме имеет некоторую исходную температуру и начинает охлаждаться одновременно во всех точках сопряжения плоскостей А со стенками изложницы путем передачи тепла в двух противоположных направлениях, перпендикулярных этим плоскостям (рис. 1 б). Тепловыми потерями конвекционного происхождения со стороны свободной поверхности слоя (верхняя плоскость С на рис. 1 б), а также вкладами в общий тепловой баланс потоков тепла, отводимых в изложницу через плоскости В и нижнюю

плоскость С, пренебрегали в сравнении с потоками в основных направлениях.

Поскольку контакт расплава с теплопроводящими стенками изложницы не является идеальным, то условия передачи тепла через плоскость А задавали конечной величиной коэффициента теплоотдачи α_1 . Его численные значения определяли по толщине слоя расплава с помощью соотношений, предложенных авторами работы [16].

Считали, что до заливки расплава изложница имеет определенную начальную температуру. В момент возникновения теплового контакта в плоскостях А температура приграничных областей стенок изложницы (зона d на рис. 1 а) повышается в соответствии с условием теплопередачи со стороны расплава, а в последующие моменты времени разогреваются и удаленные от плоскостей А зоны e и f теплоприемника. При этом создаются физические предпосылки для теплообмена между внешними стенками изложницы, параллельными плоскостям А, и находящейся при комнатной температуре рабочей средой, в качестве которой рассматривали спокойный воздух. Эффект теплообмена изложницы с внешней средой оценивали с помощью коэффициента теплоотдачи α_2 , значения которого заимствовали из работы [17].

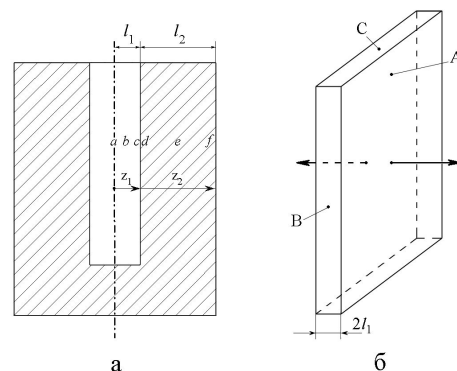


Рис. 1. Схема изложницы (а) для получения плоскопараллельных отливок малой толщины (б): l_1 – полутолщина отливки; l_2 – толщина теплоотводящей стенки изложницы; z_i – координата в направлении теплоотвода в пределах отливки ($i=1; 0 \leq z_1 \leq l_1$) и изложницы ($i=2; 0 \leq z_2 \leq l_2$); $a-f$ – обозначения анализируемых зон в слое расплава ($a-c$) и стенке изложницы ($d-f$); А, В, С – обозначения внешних граней отливки; \longleftrightarrow – направления преимущественного теплоотвода.

Математическая модель. Для решения тепловой задачи использовали систему одномерных дифференциальных уравнений теплопроводности [18] для расплава (1) и изложницы (2) с крайними условиями (3) – (8), формализующими рассмотренные выше физические допущения модели:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1(z_1, t)}{\partial t} = k_1 \frac{\partial^2 T_1(z_1, t)}{\partial z_1^2}, \quad (1)$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2(z_2, t)}{\partial t} = k_2 \frac{\partial^2 T_2(z_2, t)}{\partial z_2^2}. \quad (2)$$

Начальное условие для расплава:

$$T_1(z_1, 0) = T_m + \Delta T_+. \quad (3)$$

Граничные условия для расплава:

– на осевой линии отливки:

$$-k_1 \frac{\partial T_1(z_1, t)}{\partial z_1} \Big|_{z_1=0} = 0; \quad (4)$$

– на границе со стенкой изложницы:

$$-k_1 \frac{\partial T_1(z_1, t)}{\partial z_1} \Big|_{z_1=l_1} = \alpha_1 [T_1(l_1, t) - T_2(0, t)] \quad (5)$$

Начальное условие для изложницы:

$$T_2(z_2, 0) = T_2^b. \quad (6)$$

Граничные условия для изложницы:

– в плоскости контакта с расплавом:

$$k_2 \frac{\partial T_2(z_2, t)}{\partial z_2} \Big|_{z_2=0} = \alpha_1 [T_2(0, t) - T_1(l_1, t)] \quad (7)$$

– на внешней стенке, граничащей с воздушной средой:

$$-k_2 \frac{\partial T_2(z_2, t)}{\partial z_2} \Big|_{z_2=l_2} = \alpha_2 [T_2(l_2, t) - T_{env}] \quad (8)$$

В уравнениях (1) – (8): $T_i(z_i, t)$, c_i , ρ_i , k_i – соответственно, температура, удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность расплава ($i=1$) и изложницы ($i=2$); t – время; T_m – температура плавления исследуемого материала; ΔT_+ – величина предварительного перегрева расплава; T_2^b – начальная температура изложницы; T_{env} – температура воздушной среды; α_i – коэффициент теплоотдачи на границах расплав-изложница ($i=1$) изложница-внешняя среда ($i=2$).

Представленную выше модель применяли для расчетного анализа термических режимов кокильного литья в зависимости от толщины отливок, условий теплообмена на внутренней и внешней стенках изложницы, природы сплавов, материала изложницы и ряда других менее существенных факторов. При проведении расчетов основывались на методологии работ [16, 19], в которых в качестве основной динамической характеристики процесса рассматривается скорость охлаждения в момент перехода расплава в переохлажденное состояние и анализируются условия перехода различных зон расплава к регулярному режиму охлаждения.

Анализ результатов моделирования. На *рис. 2* представлены результаты модельных расчетов в виде кривых охлаждения и зависимостей скорости охлаждения от времени для отливок разной толщины. Представленные графические зависимости демонстрируют ход изменения температуры и скорости охлаждения со временем в трех анализируемых зонах (а, б, с) слоя жидкого сплава Vit101. Как видно, независимо от величины l_1 , в начальные моменты процесса участки расплава, контактирующие с рабочей поверхностью изложницы, охлаждаются наиболее интенсивно, а с течением времени скорость их охлаждения снижается (кривые с на *рис. 2*). Наоборот, в промежуточной (б) и центральной (а) зонах расплава скорость охлаждения сначала возрастает, а после достижения некоторого близкого для всех зон уровня начинает согласованно снижаться.

Различия начальных режимов охлаждения исследуемых зон и их последующее выравнивание свидетельствует об установлении во всем объеме расплава с некоторого момента t_r регулярного режима охлаждения. Длительность нерегулярного этапа охлаждения для тонких (0,1 мм) слоев составляет относительно неболь-

шую долю (~10%) от общей продолжительности пребывания расплава в перегретом состоянии t_c^m . С ростом величины l_1 начальные различия режимов охлаждения сохраняются в течение более длительных отрезков времени, которые приближаются к t_c^m . Все же для всех исследованных в работе значений l_1 величина приведенного времени установления регулярного режима t_r / t_c^m остается меньше единицы (*рис. 3*). Следовательно, при литье легко стеклющихся расплавов в металлическую изложницу процессы формирования структуры в области температур $T < T_m$ осуществляются в условиях регулярного режима охлаждения.

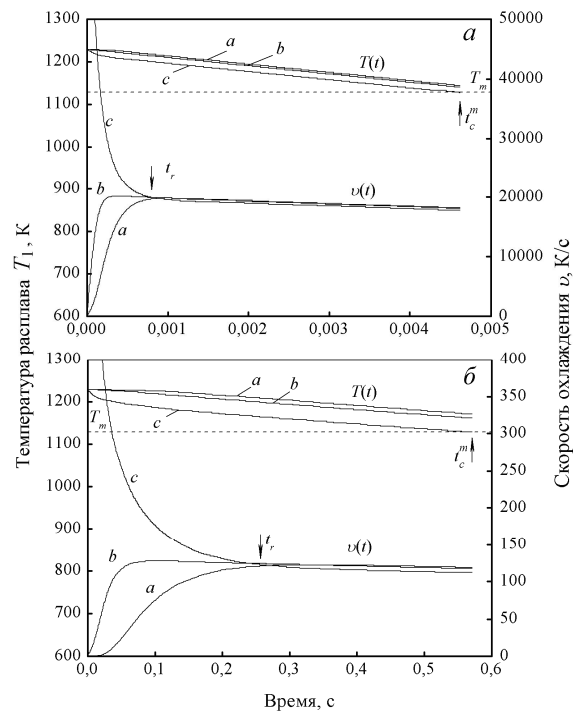


Рис. 2. Графики изменения со временем температуры $T(t)$ и скорости охлаждения $v(t)$ трех анализируемых зон (а, б, с) слоя жидкого сплава Vit 101, залитого в медную изложницу.

Параметры модели:

- фиксированные: $\Delta T_+ = 100$ К; $\Delta T_2^b = 293$ К; $l_2 = 15$ мм; $\alpha_2 = 5$ Вт/(м²·К);
- варьируемые: $l_1 = 0,1$ мм, $\alpha_1 = 10^4$ Вт/(м²·К) (а); $l_1 = 2$ мм, $\alpha_1 = 1,3 \cdot 10^3$ Вт/(м²·К) (б)

Поскольку величина v на регулярной стадии процесса уменьшается со временем, полагали, что основной динамической характеристикой, которая предопределяет закономерности кристаллизации при затвердевании отливок, может служить значение скорости охлаждения, соответствующее моменту t_c^m перехода контактной зоны С в переохлажденное состояние, т.е. v_c^m . С целью упрощения записи далее эту характеристику будем обозначать v_m .

Согласно данным работ [16, 19], из множества теплофизических и технологических переменных, вхо-

дящих в уравнения (1) – (8) математического базиса тепловой задачи и, следовательно, влияющих на результаты ее решения, наиболее значимыми факторами являются толщина слоя расплава l_1 и качество его контакта с теплоприемником, которое характеризуется величиной коэффициента теплоотдачи α_1 . Авторами цитируемых работ получено уравнение, позволяющее по заданным значениям сильнодействующих параметров рассчитывать скорость охлаждения расплава v_m . Показано, что в реальных технологиях быстрого охлаждения расплавов анализируемые параметры не являются независимыми переменными. В различных интервалах значений l_1 , которые соответствуют методам выстрела ($l_1 < 20$ мкм), закалки на движущихся подложках ($20 \leq l_1 \leq 100$ мкм) и кокильного литья ($l_1 > 100$ мкм), они связаны друг с другом специфическими линейными зависимостями, имеющими общую тенденцию роста значений α_1 с уменьшением величины l_1 . Обобщением результатов выполненных исследований получены соотношения, позволяющие рассчитывать скорость охлаждения по толщине слоя расплава l_1 .

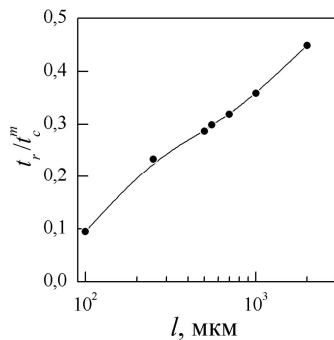


Рис. 3. Влияние полутолщины слоя расплава Vit 101 на приведенное время t_r/t_c^m установления регулярного режима охлаждения при условиях литья, отвечающих параметрам модели на рис. 1.

Важным достоинством этих соотношений является то, что полученные с их помощью значения v_m хорошо согласуются с обширным массивом экспериментальных оценок, опубликованных в литературе для различных комбинаций „расплав-подложка” и используемых в экспериментах технологических режимов. Последнее обстоятельство свидетельствует об универсальности подхода [16] и о возможности его применения к процессам кокильного литья легко стеклующихся сплавов, которые исследуются в настоящей работе.

С целью анализа вероятного влияния на величину v_m слабодействующих факторов были выполнены расчеты скорости охлаждения для двух сплавов Vit 101 и Vit 1 с существенно различным химическим составом. Полагали, что, в соответствии с представленной моделью, перегретые жидкие сплавы охлаждаются путем отвода теплоты в стенки металлической изложницы, изготовленной из разных материалов. В этой серии расчетов полутолщину слоя расплава изменяли в пределах от 0,25 до 5 мм, величину его предварительного перегрева – от 50 до 300 К, а в качестве материалов изложницы рассматривали медь и титан.

Для различных значений l_1 величину коэффициента теплоотдачи α_1 определяли по методике работы [16] с помощью соотношения:

$$\lg \alpha_1 = 5,39 - 0,69 \lg l_1, \text{ для } l_1 > 100 \text{ мкм.} \quad (9)$$

Пределы изменения параметра ΔT_+ (50–300)К задавали, предполагая возможность их воспроизводства в экспериментальных исследованиях. При этом исходили из того, что при малых (<50К) величинах перегрева затвердевание расплава может начаться еще до завершения процесса заполнения изложницы, а при больших (>300К) – растет вероятность изменения химического состава расплава вследствие его взаимодействия с рабочей средой и стенками контейнера.

Выбор материалов для изготовления изложницы осуществляли по величине тройного произведения удельной теплоемкости, плотности и теплопроводности ($c_2 \cdot \rho_2 \cdot k_2$), которая, по данным [20], является более действенной характеристикой охлаждающей способности теплоприемника, нежели величина его температуропроводности ($k_2/(c_2 \cdot \rho_2)$). Согласно этому критерию, в ряду широко применяемых технических металлов и сплавов медь и титан являются, соответственно, наиболее и наименее эффективными материалами по способности пропускать тепловые потоки.

В таблице 1 представлены результаты расчетов скорости охлаждения v_m в зависимости от состава сплавов и материала изложницы, выполненных в предположении неизменной величины перегрева расплава $\Delta T_+ = 100$ К.

Анализ табличных данных показывает, что комплекс теплофизических характеристик сплава Vit 101 при прочих равных параметрах модели обеспечивает более высокие значения v_m в сравнении со сплавом Vit 1. При литье в Cu-изложницу средняя величина относительных различий скорости охлаждения двух анализируемых сплавов составляет приблизительно 0,36, а при использовании Ti-изложницы ~0,41.

Таблица 1. Влияние состава сплавов и материала изложницы (Cu, Ti) на скорость охлаждения кокильных отливок

Сплав	l_1 , мм	α_1 , Вт/(м ² ·К)	v_m , К/с	
			Cu	Ti
Cu ₄₇ Ni ₈ Ti ₃₄ Zr ₁₁ (Vit 101)	0,25	5,4·10 ³	3,8·10 ³	3,1·10 ³
	0,5	3,4·10 ³	1,2·10 ³	9,7·10 ²
	1	2,1·10 ³	3,7·10 ²	2,9·10 ²
	2	1,3·10 ³	1,1·10 ²	8,8·10 ¹
	5	6,9·10 ²	2,3·10 ¹	1,8·10 ¹
Zr _{41,2} Ti _{13,8} Cu _{12,5} Ni ₁₀ Be _{22,5} (Vit 1)	0,25	5,4·10 ³	2,4·10 ³	1,9·10 ³
	0,5	3,4·10 ³	7,4·10 ²	5,7·10 ²
	1	2,1·10 ³	2,7·10 ²	1,7·10 ²
	2	1,3·10 ³	6,9·10 ¹	5,1·10 ¹
	5	6,9·10 ²	1,4·10 ¹	1·10 ¹

Материал изложницы оказывает менее существенное влияние на величину v_m . Как и следовало ожидать, при замене медной изложницы титановой наблюдается снижение скорости охлаждения в среднем на 0,20 для расплава Vit 101 и на 0,27 для расплава Vit 1.

Несмотря на выявленные расчетами различия скоростей охлаждения при литье легко стеклующихся

расплавов в металлическую изложницу, следует отметить их относительно невысокий уровень ($\sim 0,2-0,4$), который сопоставим с величиной погрешностей в экспериментальных и теоретических оценках v_m . Полученный результат согласуется с выводами работ [16, 19], сделанными применительно к расплавам чистых металлов, которые охлаждаются путем отвода тепла в полубесконечную подложку. Отсюда следует, что ни состав расплава, ни материал изложницы не относятся к числу факторов, контролирующих термический режим процесса кокильного литья.

Еще менее ощутимое влияние на динамику охлаждения кокильных отливок оказывает величина предварительного перегрева расплава. Согласно полученным расчетным данным, для анализируемого варианта модели с ростом значений ΔT_+ от 100 до 300 К увеличиваются время t_m нахождения расплава при температурах $T > T_m$, а также значения скорости охлаждения во все моменты времени $t < t_m$. Однако основные динамические характеристики процесса, а именно, время t , установления регулярного режима охлаждения и скорость охлаждения v_m , соответствующая моменту достижения расплавом температуры плавления, остаются практически неизменными.

Выводы

1. Для технологии литья перегретого расплава в металлическую изложницу выполнен расчетный анализ кривых охлаждения $T(t)$ и зависимостей скорости охлаждения от времени. Показано, что в начальные моменты процесса участки расплава, расположенные на разных расстояниях от теплоотводящей стенки изложницы, охлаждаются с существенно различными скоростями. С течением времени скорости охлаждения различных зон выравниваются и во всем объеме расплава устанавливается регулярный режим.

2. Установлено, что с ростом толщины отливок длительность нерегулярного этапа охлаждения возрастает, оставаясь тем не менее меньше времени достижения расплавом температуры плавления.

3. Проанализировано влияние теплофизических и технологических переменных, входящих в уравнение математического базиса модели, на динамику охлаждения расплава. Показано, что основными факторами, задающими величину v_m , являются толщина слоя расплава l_1 и качество его контакта с теплоприемником, которое характеризуется величиной коэффициента теплоотдачи α_1 . К слабействующим факторам относятся химический состав сплавов, величина предварительного

перегрева расплава и материал изложницы. Вариации этих факторов вызывают относительно небольшие (20–40%) изменения величины v_m , которые сопоставимы с уровнями погрешностей в экспериментальных и теоретических оценках скорости охлаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мирошниченко И. С. Закалка из жидкого состояния. Москва. Металлургия. 1982. 168 с.
2. Jones H. Mater. Sci. Eng. A., 304-306, 2001, 11-19
3. Маслов В. В., Падерно Д. Ю. Аморфные металлические сплавы. Киев. Наукова думка. 1987. С. 52—86.
4. Warlimont H. Mater. Sci. Eng. A 304-306. 2001. С. 61—67.
5. Золотухин И. В. Физические свойства аморфных металлических материалов. Москва. Металлургия, 1986. 176 с.
6. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. Москва. Металлургия. 1987. 328 с.
7. Predeki P., Mullendore A. W., Grant N. J., Trans. Soc. AIME. 233. 1965. С. 1581—1586.
8. Пасальский В. М., Полеся А. Ф., Чалый И. И. Рост и дефекты металлических кристаллов. Наукова думка. Киев. 1972. С. 427—431.
9. Bewlay B. P., Cantor B., Intern. J. Rapid Solidification, 2. 1986. С. 107—123.
10. Tkatch V. I., Denisenko S. N., Beloshov O. N., Acta Mater., 45. №7. 1997. С. 2821—2826.
11. Matyja H., Gissen B. C., Grant N. J., J. Inst. Met., 96, 1968. С. 30—32.
12. Jones H. Mater. Sci. Eng., 65. 1984. С. 145—156.
13. Davies H. A., Hull B. J. J. Mater. Sci., 11. 1976. С. 215—223.
14. Ruhl R. C. Mater. Sci. Eng., 1. 1967. С. 313—320.
15. Jones H. Treatise Mater. Sci. Technol.. 20. 1981. С. 1—72.
16. Лысенко А. Б., Борисова Г. В., Кравец О. Л. Физика и техника высоких давлений, 14. № 1. 2004. С. 44—53.
17. Баскаков А. П., Берг Б. В., Витт О. К. Теплотехника. Москва. Энергоатомиздат. 1991. 224 с.
18. Лыков А. В. Теория теплопроводности. Москва. Высшая школа. 1967. 600 с.
19. Лысенко О., Кравец О., Губарев С. Вісник Львів. ун-ту. 38. 2005. С. 135—146.
20. Кавеш Ш. Принципы производства. Металлические стекла. Москва. Металлургия. 1984. С. 36—73.