

ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ НАУКИ

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2019-5-69-1>

УДК 536.12:532.782

Косинська О.Л., Шевелева К.Ю.
Дніпровський державний технічний університет

АНАЛІЗ РЕЖИМІВ ОХОЛОДЖЕННЯ РОЗПЛАВУ ПРИ ЛИТТІ У МЕТАЛЕВУ ВИЛИВНИЦЮ

Анотація. В роботі представлено модифіковану математичну модель охолодження розплаву при литті у металеву виливницю. З використанням представленої моделі виконано розрахунковий аналіз процесів теплоперенесення та швидкості охолодження розплаву схильного до об'ємної аморфізації сплаву $Zr_{41,2}Ti_{13,8}Cu_{12,5}Ni_{10}Be_{22,5}$. Проведено порівняльний аналіз результатів моделювання отриманих за традиційною та модифікованою моделями. Показано, що значення швидкостей охолодження розплаву, отриманих за двома моделями, в інтервалі напівтовщин виливок від 2 до 25 мм різняться на 1–38%, відповідно.

Ключові слова: лиття у металеву виливницю, комп'ютерне моделювання, процеси теплоперенесення, режим охолодження, швидкість охолодження.

Kosynska Olha, Shevelieva Kateryna
Dniprovsk State Technical University

ANALYSIS OF COOLING REGIMES AT CASTING IN METAL MOLD

Summary. The modified mathematical model of melt cooling during casting in a metal mold is presented in the work. The mathematical model of heat transfer processes is based on the equations of thermal conductivity for the melt and the mold with the corresponding boundary conditions, which reflect the processes of heat exchange at the melt-mold and the mold-environment boundaries. Using the presented model, a calculated analysis of the heat transfer processes and the cooling rate of the melt $Zr_{41,2}Ti_{13,8}Cu_{12,5}Ni_{10}Be_{22,5}$, able to bulk amorphization, was performed. A comparative analysis of modeling results obtained from traditional and modified models was carried out. The simulation results were presented in the form of temperature dependences over the cross section of the melt and the mold and dependences of temperature and cooling rate on time. It has been established that in the whole investigated thickness range the melt is cooled under conditions of a regular cooling mode. It is shown that with half-thicknesses of ingots less than 1 mm, both considered models give exactly the same results. With an increase in the ingot half-thickness (more than 1 mm), an increase in the difference between the simulation results obtained by two models is observed. So, the duration of the regular cooling mode t_r , in calculations using the traditional model, is 1.4 times longer, compared to t_r obtained from the modified model. As for the cooling rate values, it is shown that they differ by 1–38% for castings with a half-thickness from 2 to 25 mm, respectively.

Keywords: casting in metal mold, computer modeling, heat transfer processes, cooling regime, cooling rate.

Постановка проблеми. Незважаючи на значний прогрес в області металургії спеціальних сплавів, умови отримання масивного металевих скла (ММС) все ще не мають однозначного визначення і знаходяться у центрі уваги дослідників [1–3]. Однією із найважливіших задач в даній області є визначення швидкості охолодження розплаву в умовах отримання ММС, оскільки саме від цієї характеристики залежать подальші процеси формування структури сплаву.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Швидкість охолодження розплаву v_m може бути визначена як експериментальними методами [4–7], так і шляхом теоретичного аналізу рівнянь теплопровідності [8; 9]. Експериментальні методи визначення швидкості охолодження не забезпечують високої точності результату і зазвичай сприймаються лише як оцінки. З цієї причини більш розповсюдженими стали методи теоретичного розрахунку швидкості охолодження.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Традиційно при моде-

люванні процесів теплоперенесення використовують математичні моделі, які враховують охолодження розплаву за рахунок контакту з напівнескінченим теплоприймачем. Такий підхід цілком виправданий при моделюванні процесів теплоперенесення в шарах розплаву товщина яких значно менша за товщину теплоприймача (наприклад, при гартуванні розплаву *splat*-методом). При отриманні ММС, з перетинами виливок до декількох сантиметрів, придатність такого підходу викликає сумнів.

Формулювання цілей статті. У зв'язку з цим в роботі, з метою вдосконалення математичної моделі, запропоновано модифіковану математичну модель, в якій розглядається можливість відведення тепла від розплаву у металеву виливницю зі стінками кінцевої товщини. Для з'ясування доцільності використання запропонованої математичної моделі, в роботі виконано порівняльний аналіз результатів моделювання процесів теплоперенесення отриманих за традиційною та модифікованою моделями.

Виклад основного матеріалу. Модельні дослідження процесів теплоперенесення в умовах кокільного лиття виконували для сплаву $Zr_{41,2}Ti_{13,8}Cu_{12,5}Ni_{10}Be_{22,5}$ (Vit 1). Обраний сплав відомий своєю схильністю до некристалічного твердіння у перетинах до 5 см. Цей факт дозволить, при виконанні модельних розрахунків, застосувати розроблені математичні моделі для виливків в широкому інтервалі товщин. Крім того, для даного сплаву відомі всі теплофізичні властивості, необхідні для виконання розрахунків, та експериментальні значення критичної швидкості охолодження v_m^c і критичного перетину l_c [10; 11], що дозволить перевірити коректність отриманих результатів моделювання.

При постановці задачі про передачу тепла між розплавом та стінкою виливниці дотримувалися наступних припущень. Вважали, що процеси теплоперенесення відбуваються за одновимірною схемою (рис. 1). В початковий момент часу шар розплаву має деяку початкову температуру $T_1^b = T_m + \Delta T_+$ (T_m – температура плавлення сплаву, ΔT_+ – перегрів розплаву) і починає охолоджуватися одночасно в усіх точках контакту з теплоприймачем. Оскільки контакт розплаву зі стінками виливниці не є ідеальним, якість контакту між розплавом і мідними стінками задавали коефіцієнтом α_1 , значення якого задавали користуючись методикою описаною в роботі [12]. До контакту розплаву зі стінками виливниці, приймали, що стінки мають деяку початкову температуру T_2^b , яка дорівнює температурі навколишнього середовища T_{cp} .

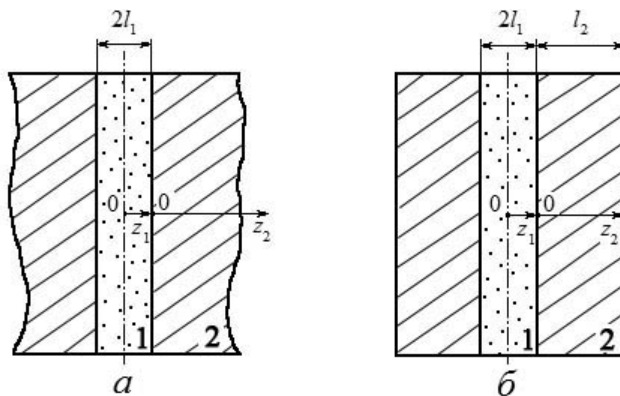


Рис. 1. Схеми одновимірного відведення тепла від розплаву у внутрішні шари стінки виливниці

$2l_1$ – товщина виливки; l_2 – товщина стінки виливниці; z_1 – координата у напрямку тепловідведення всередині виливки ($0 \leq z_1 \leq l_1$); z_2 – координата у напрямку тепловідведення у межах стінки виливниці ($a - 0 \leq z_2 < \infty$; $b - 0 \leq z \leq l_2$)

Вважали, що в процесі охолодження розплаву у виливниці з напівнескінченими стінками температура верхніх шарів стінок підвищувалася згідно до умов теплопередачі з боку розплаву, тоді як на великій відстані від робочої поверхні її температура не змінюється (модель 1). При контакті розплаву з виливницею зі стінками кінцевої товщини температура виливниці підвищується і виникає процес теплообміну з навколишнім середовищем, зі спокійним повітрям (модель 2). Врахування цього ефекту виконували за допомогою коефіцієнта α_2 , значення якого підбирали згідно рекомендаціям роботи [13]. Розрахунки виконували для однофазного рідкого стану, тобто до моменту досягнення розплавом температури плавлення.

Відповідно до цих наближень, математичну модель представили одновимірними диференціальними рівняннями теплопровідності [14] для розплаву (1) та виливниці (2), відповідними початковими умовами (3), (4) та граничними умовами (5) – (10):

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

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

Початкові умови для розплаву

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

та підкладки

$$T_2(z_2, 0) = T_2^b \quad (4)$$

Граничні умови для розплаву:

– на осевій лінії розплаву

$$-k_1 \frac{\partial T_1(z_1, t)}{\partial z_1} \Big|_{z_1=0} = 0; \quad (5)$$

– на межі контакту розплаву зі стінкою виливниці

$$-k_1 \frac{\partial T_1(z_1, t)}{\partial z_1} \Big|_{z_1=l_1} = \alpha_1 [T_1(l_1, t) - T_2(0, t)]; \quad (6)$$

Граничні умови для виливниці:

– для напівнескінченої виливниці (модель 1)

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

$$T_2(z_2 \rightarrow \infty, t) = T_2^b; \quad (8)$$

– для виливниці зі стінками кінцевої товщини (модель 2)

$$-k_2 \frac{\partial T_2(z_2, t)}{\partial z_2} \Big|_{z_2=0} = -\alpha_1 [T_2(0, t) - T_1(l_1, t)], \quad (9)$$

$$-k_2 \frac{\partial T_2(z_2, t)}{\partial z_2} \Big|_{z_2=l_2} = \alpha_2 [T_2(l_2, t) - T_{cp}]. \quad (10)$$

В наведених рівняннях $T_i(z_i, t)$, c_i , ρ_i , k_i – відповідно, температура, питома теплоємність, густина та теплопровідність розплаву ($i=1$) і виливниці ($i=2$); t – час; α_1 – коефіцієнт тепловіддачі на межі розплав-виливниця; α_2 – коефіцієнт тепловіддачі на межі виливниця-навколишнє середовище (для спокійного повітря $\alpha_2 = 5$ Вт/(м²·К) [13]). Розв'язання систем рівнянь моделей 1 та 2 виконували чисельним методом скінчених різниць [15] з використанням явної різницевої схеми.

Представлені математичні моделі використовували для вивчення термічних режимів охолодження в умовах кокільного лиття розплаву в залежності від товщини виливків та умов теплообміну на внутрішній та зовнішній стінках виливниці. Розрахункові експерименти проводили для ідентичних вихідних параметрів (попередній перегрів розплаву ΔT_+ , початкова температура виливниці T_2^b , матеріал розплаву, матеріал виливниці), після чого отримані результати порівнювалися для з'ясування доцільності використання першого або другого варіанта математичних моделей.

Для дослідження динаміки охолодження розплаву в умовах лиття у металеву виливницю, вивчали особливості температурного поля у перетинах виливків та теплоприймача, а також залежності зміни температури з часом $T_1(t)$, у якос-

ті основної динамічної характеристики процесу теплоперенесення вважали величину швидкості охолодження v_m в момент досягнення розплавом температури плавлення [12].

На рисунках 2 та 3 наведено результати моделювання процесів теплоперенесення розплаву із сплаву Vit 1, що охолоджується при литті у мідяну виливницю з напівнескінченими стінками (рис. 2) та литті у виливницю зі стінками кінцевої товщини $l_2=15$ мм (рис. 3). Розрахункові дані наведено у вигляді графіків розподілу температури у напрямку тепловідведення у перетині шарів розплаву різної товщини та теплоприймача. В наведених розрахунках фіксованими були такі параметри як величина попереднього перегріву $\Delta T^+=100$ К та початкова температура теплоприймача $T_2^b=293$ К. У якості змінних параметрів виступали товщина шару розплаву $2l_1$ та коефіцієнт тепловіддачі α_1 на межі контакту розплаву з теплоприймачем. Оскільки параметр α_1 є залежним від l_1 , його величину оцінювали за залежностями $\alpha_1(l_1)$, що наведено у роботі [12].

При аналізі даних, отриманих від кожної моделі можна зазначити, що на характер представлених залежностей суттєвий вплив чинить товщина шару розплаву. Так для моделі 1, для шарів розплаву з напівтовщиною 0,25 мм, на початкових стадіях процесу охолодження, між центральною та контактною зонами розплаву виникає відносно

невеликий перепад температур $\Delta T_{1-3}=12$ К, який зберігається до кінцевого моменту $t_m=3,5 \cdot 10^{-2}$ с. За цей проміжок часу шари підкладки, що суміжні з розплавом нагріваються приблизно на 314 К, а глибина прогрівання підкладки складає 5,7 мм. Слід зауважити, що результати моделювання отримані за допомогою моделі 2 для ідентичних вихідних даних мають повне співпадання з результатами отриманих за моделлю 1.

При збільшенні напівтовщини шару розплаву до 10 мм величина ΔT_{1-3} збільшується більше ніж у три рази та досягає значень 38 К. При цьому також зростає і ступінь прогрівання поверхневих шарів виливниці: температура поверхні теплоприймача складає 325 К, а глибина прогрівання – приблизно 120 мм. Щодо результатів отриманих за моделлю 2, то всередині розплаву ΔT_{1-3} складає 40 К та спостерігається наскрізне прогрівання стінок виливниці, температура поверхні стінки виливниці, що контактує з розплавом нагрівається до температури 377 К, а зовнішня поверхня виливниці – до температури 373 К.

Виявлення кризового прогрівання стінок виливниці, підтверджує виникнення теплообміну виливниці з навколишнім середовищем і доцільність використання моделі, що враховує теплообмін з навколишнім середовищем.

Для більш детального аналізу результатів отриманих для двох моделей будували залеж-

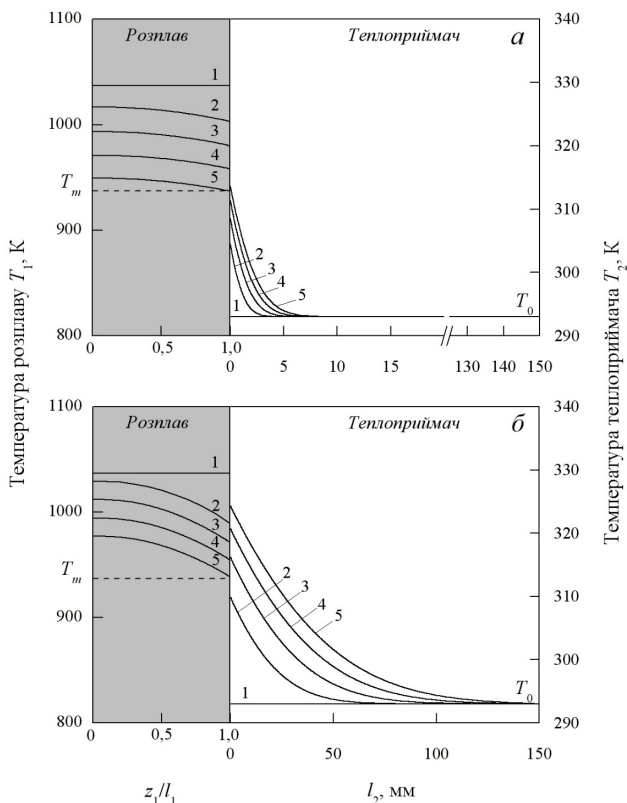


Рис. 2. Криві розподілу температури у напрямку тепловідведення для шарів розплаву Vit 1, що охолоджується у мідній виливниці з напівнескінченими стінками у різні моменти часу: 1 – $t=0$; 2 – $t=0,25t_m$; 3 – $t=0,5t_m$; 4 – $t=0,75t_m$; 5 – $t=t_m$ (t_m – час за який шар розплаву, що контактує з тілом-холодильником досягає температури T_m) для шарів з $l_1=0,25$ мм (а) та $l_1=10$ мм (б). Значення вихідних параметрів: $\Delta T^+=100$ К, $T_2^0=293$ К

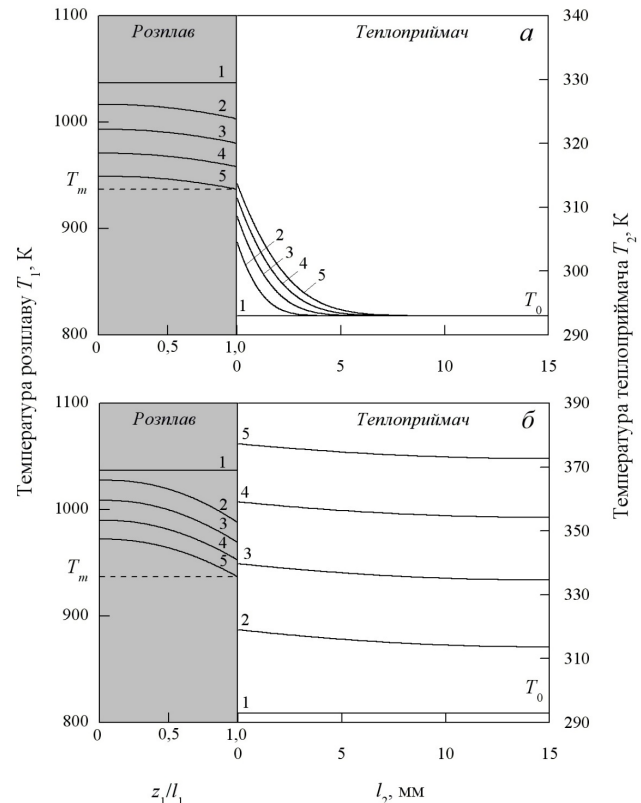


Рис. 3. Криві розподілу температури у напрямку тепловідведення для шарів розплаву Vit 1, що охолоджується у мідній виливниці зі стінками кінцевої товщини, у різні моменти часу: 1 – $t=0$; 2 – $t=0,25t_m$; 3 – $t=0,5t_m$; 4 – $t=0,75t_m$; 5 – $t=t_m$ (t_m – час за який шар розплаву, що контактує з тілом-холодильником досягає температури T_m) для шарів з $l_1=0,25$ мм (а) та $l_1=10$ мм (б). Значення вихідних параметрів: $\Delta T^+=100$ К, $T_2^0=293$ К, $l_2=15$ мм

ності температури та швидкості охолодження від часу. Приклади залежностей $T(t)$ та $v(t)$ представлено на рисунках 4 і 5. Порівняння розрахункових залежностей, отриманих для різних товщин розплаву та різних математичних моделей, показує, що цим залежностям характерні як загальні зовнішні ознаки протікання процесу так і деякі кількісні відмінності величин, що контролюються.

Так однією із характерних ознак залежностей $v(t)$ є те, що незалежно від товщини розплавленого шару металу, зона розплаву, що контактує з теплоприймачем охолоджується на початкових етапах найбільш інтенсивно, потім її швидкість охолодження поступово знижується. Центральна зона розплаву і зона на відстані $0,5 \cdot l_1$ від стінки виливниці охолоджуються в інших умовах: їх швидкості охолодження спочатку збільшуються, а після досягнення деякого значення починають синхронно знижуватися. Така різниця початкових режимів охолодження вказаних зон та їх подальше вирівнювання приводять до встановлення з деякого моменту часу t_r регулярного режиму охолодження. Тривалість нерегулярного етапу

охолодження залежить від товщини шару розплаву і від обраної математичної моделі. Так для моделі 1 в інтервалі напівтовщин шару розплаву l_1 від 0,25 мм до 25 мм тривалість нерегулярного етапу охолодження змінюється, відповідно, від 6 до 50% від загальної тривалості знаходження розплаву у перегрітому стані t_m . Для моделі 2, для вказаного вище інтервалу l_1 , ця величина змінюється від 6 до 35%. В узагальненому вигляді ці результати представлені на рисунку 6 у вигляді залежностей $t_r/t_m(l_1)$. Видно, що в усіх випадках, твердіння розплаву буде відбуватися на стадії регулярного режиму охолодження ($t_r/t_m < 1$), тому для характеристики режиму охолодження використовували однакове для всіх шарів розплаву значення швидкості охолодження.

Оскільки величина v_m є важливою характеристикою режиму охолодження і саме вона буде визначати закономірності кристалізації при твердінні розплаву, один із блоків розрахунків присвячували вивченню того на скільки вибір математичної моделі може чинити вплив на значення швидкості охолодження. Результати розрахунків представляли у вигляді залежностей $v_m(l_1)$ (рис. 7).

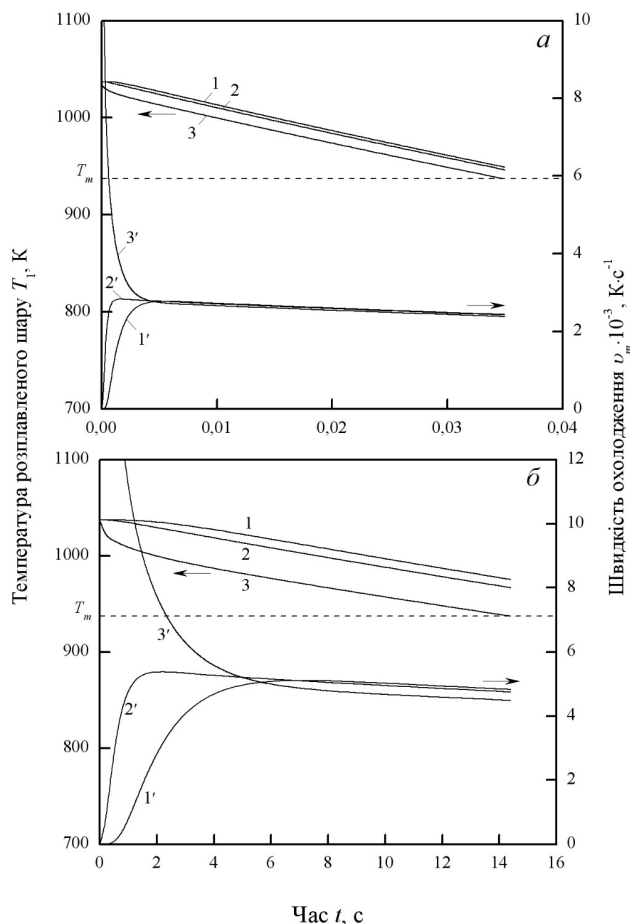


Рис. 4. Залежності змінення температури (1–3) та швидкостей охолодження (1'–3') від часу для центральної зони (1, 1'), зони на відстані $0,5 \cdot l_1$ від центру шару розплаву (2, 2') та контактної зони (3, 3') розплавленого шару сплаву Vit 1 з напівтовщиною $l_1=0,25$ мм (а) та $l_1=10$ мм (б), що охолоджуються у мідній виливниці з напівнескінченими стінками. Значення вихідних параметрів такі ж, як на рис. 2

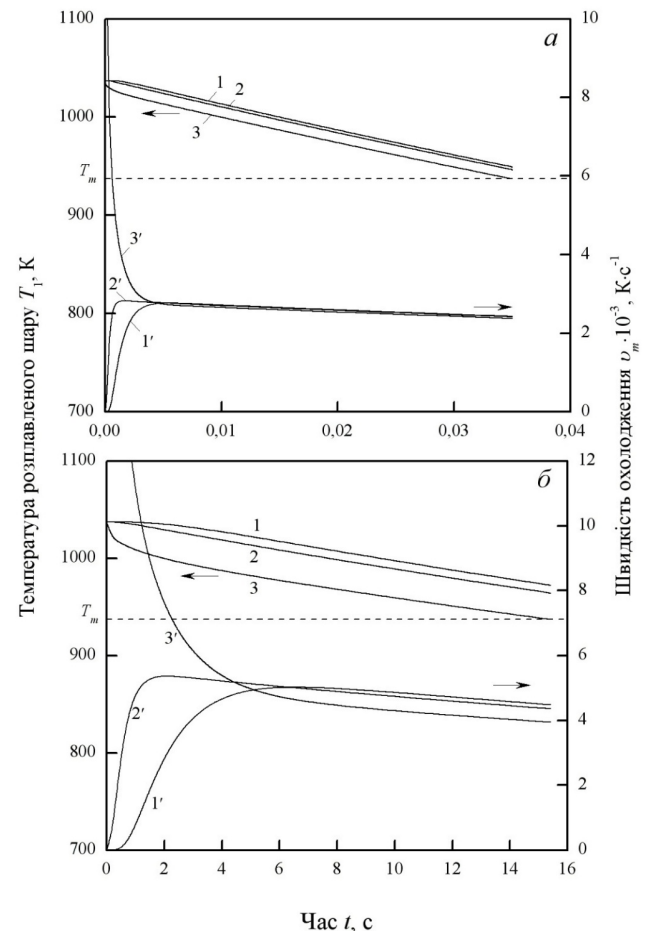


Рис. 5. Залежності змінення температури (1–3) та швидкостей охолодження (1'–3') від часу для центральної зони (1, 1'), зони на відстані $0,5 \cdot l_1$ від центру шару розплаву (2, 2') та контактної зони (3, 3') розплавленого шару сплаву Vit 1 з напівтовщиною $l_1=0,25$ мм (а) та $l_1=10$ мм (б), що охолоджується у мідній виливниці з кінцевою товщиною стінок. Значення вихідних параметрів такі ж, як на рис. 3

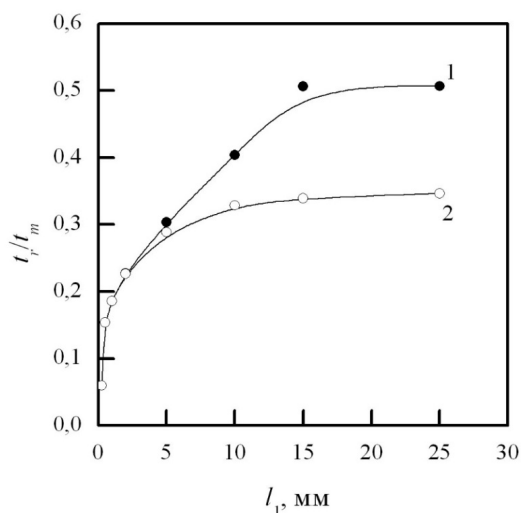


Рис. 6. Залежності $t_i/t_m(l_1)$ для шарів розплаву Vit 1, що охолоджуються у мідній виливниці з напівнескінченими стінками (1) та в умовах охолодження у мідній виливниці з кінцевою товщиною стінок (2)

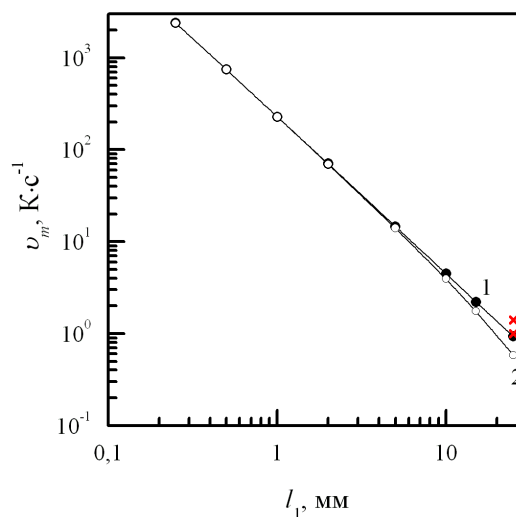


Рис. 7. Залежності $v_m(l_1)$ для розплавлених шарів Vit 1, що охолоджуються у мідній виливниці з напівнескінченими стінками (1) та в умовах охолодження в мідній виливниці з товщиною стінки $l_2=15$ мм (2)

× – експериментальні значення [10; 11]

Аналіз представлених даних показує, що обидві моделі при $l_1 \leq 1$ мм дають абсолютно ідентичні результати, а при $l_1 > 1$ мм значення v_m , розраховані за моделлю 1 та 2, починають розрізнятися. Так при $l_1=2$ мм різниця між швидкостями охолодження розрахованих за моделлю 1 та 2 складає лише 1%, а при збільшенні величини l_1 до 25 мм різниця між швидкостями охолодження збільшується до 38%. Швидкості охолодження отримані за моделлю 1 мають більш високі значення.

Висновки з даного дослідження і перспективи. Таким чином за допомогою отриманих результатів, встановлено, що вибір математичної моделі впливає на кінцеві результати розрахунків процесів теплоперенесення в шарах розплаву $Zr_{41,2}Ti_{13,8}Cu_{12,5}Ni_{10}Be_{22,5}$ товщиною понад 1 мм. Із збільшенням товщини шару розплаву, різниця між результатами моделювання, що отримані за моделлю 1 та 2, помітно збільшується.

Список літератури:

1. Yang G.N., Shao Y., Yao K.F., Chen S.Q. A study of cooling process in bulk metallic glasses fabrication. *AIP Advances*. 2015. Vol. 5, № 11. P. 17111-1–17111-9. (doi: 10.1063/1.4935440)
2. Schroes J., Johnson W.L. Crystallization of $Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12}Ni_{10}Be_{23}$. *Materials Transactions, JIM*. 2000. Vol. 41, № 11. P. 1530–1537. (doi: 10.2320/matertrans1989.41.1530)
3. Tang R., Zhou B., Ma Y., Jia F., Zhang X. Numerical simulation of Zr-based bulk metallic glass during continuous casting solidification process. *Materials Research*. 2015. Vol. 18, № 1. P. 3–9. (<http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.319814>)
4. Predeki P., Mullendore A.W., Grant N.J. A study of the splat cooling technique. *Trans.Met.Soc.AIME*. 1965. Vol. 233, P. 1581–1586. (doi: 10.18007/gisap:tsc.v0i6.1145)
5. Davies H.A., Hull J.B. Some aspects of splat-quenching in an inert atmosphere and of the formation of non-crystalline phases in Al-17,3 at.% Cu, germanium and tellurium. *J. Mater. Sci.* 1974. Vol. 9. P. 707–717.
6. Tkatch V.I., Denisenko S.N., Beloshov O.N. Direct measurements of the cooling rates in the single roller rapid solidification technique. *Acta Mater.* 1997. Vol. 45, № 7. P. 2821–2826. ([https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(96\)00377-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(96)00377-1))
7. Джоунс Г. Экспериментальные методы быстрой закалки из расплава. *Сверхбыстрая закалка жидких сплавов*. Москва, 1986. С. 12–67.
8. Ruhl R.C. Cooling rate in splat cooling. *Mater. Sci. Eng.* 1967. Vol. 1. P. 313–320.
9. Мирошниченко И.С. Закалка из жидкого состояния. Москва, 1982. 168 с.
10. Qing-Ping C., Jin-Fu L., Yao-He Z. Glass forming ability of metallic glasses evaluated by a new criterion. *Chin.Phys.Lett.* 2008. Vol. 25, № 9, P. 3459–3462. (doi: 10.1088/0256-307X/25/9/098)
11. Miller M., Liaw P. *Bulk Metallic Glasses*. Springer Science Business Media, 2008. 236 p.
12. Лысенко А.Б., Борисова Г.В., Кравец О.Л. Расчет скорости охлаждения при закалке сплавов из жидкого состояния. *ФизТВД*. 2004. Т. 14, № 1. С. 44–53.

13. Баскаков А.П., Берг Б.В., Витт О.К. Теплотехника. Москва, 1991. 224 с.
14. Лыков А.В. Теория теплопроводности. Москва, 1967. 600 с.
15. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. Москва, 1971. 552 с.
16. Немощкаленко В.В., Романова А.В., Ильинский А.Г. и др. Аморфные металлические сплавы. Киев, 1987. 248 с.

References:

1. Yang G.N., Shao Y., Yao K.F., Chen S.Q. A study of cooling process in bulk metallic glasses fabrication. *AIP Advances*. 2015. Vol. 5, № 11. P. 17111-1–117111-9. (doi: 10.1063/1.4935440)
2. Schroes J., Johnson W.L. Crystallization of $Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12}Ni_{10}Be_{23}$. *Materials Transactions, JIM*. 2000. Vol. 41, № 11. P.1530-1537. (doi: 10.2320/matertrans1989.41.1530)
3. Tang R., Zhou B., Ma Y., Jia F., Zhang X. Numerical simulation of Zr-based bulk metallic glass during continuous casting solidification process. *Materials Research*. 2015. Vol. 18, № 1. P. 3–9. (<http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.319814>)
4. Predeki P., Mullendore A.W., Grant N.J. A study of the splat cooling technique. *Trans.Met.Soc.AIME*. 1965. Vol. 233. P. 1581–1586. (doi: 10.18007/gisap:tsc.v0i6.1145)
5. Davies H.A., Hull J.B. Some aspects of splat-quenching in an inert atmosphere and of the formation of non-crystalline phases in Al-17,3 at.% Cu, germanium and tellurium. *J. Mater. Sci.* 1974. Vol. 9. P. 707–717.
6. Tkatch V.I., Denisenko S.N., Beloshov O.N. Direct measurements of the cooling rates in the single roller rapid solidification technique. *Acta Mater.* 1997. Vol. 45. №7. P. 2821–2826. ([https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(96\)00377-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(96)00377-1))
7. Dzhouns G. (1986). Eksperimentalnye metody bystroj zakalki iz rasplava. [Experimental rapid melt quenching methods] Sverhbystraya zakalka zhidkih splavov [Rapid quenching of liquid alloys]. Moskva : Metallurgiya, pp. 12–67. (in Russian)
8. Ruhl R.C. Cooling rate in splat cooling. *Mater. Sci. Eng.* 1967. Vol. 1. P. 313–320.
9. Miroshnichenko I.S. (1982). Zakalka iz zhidkogo sostoyaniya [Quenching from liquid state]. Moskva : Metallurgiya. (in Russian)
10. Qing-Ping C., Jin-Fu L., Yao-He Z. Glass forming ability of metallic glasses evaluated by a new criterion. *Chin.Phys.Lett.* 2008. Vol. 25, № 9. P. 3459–3462. (doi: 10.1088/0256-307X/25/9/098)
11. Miller M., Liaw P. Bulk Metallic Glasses. Springer Science Business Media, 2008. 236 p.
12. Lysenko A.B., Borisova G.V., Kravec O.L. (2004). Raschet skorosti ohlazhdeniya pri zakalke splavov iz zhidkogo sostoyaniya [Calculation of the cooling rate during quenching alloys from the liquid state]. *High pressure physics and technology*. Vol. 14, № 1. Pp. 44–53. (in Russian)
13. Lykov A.V. (1967). Teoriya teploprovodnosti [Heat conduction theory]. Moskva : Vysshaya shkola. (in Russian)
14. Nemoshkalenko V.V., Romanova A.V., Ilinskij A.G. i dr. (1987). Amorfnye metallicheskie splavy [Amorphous Metal Alloys]. Kyiv : Naukova dumka. (in Russian)