

УДК 536.248.2

Павленко А.М., Усенко Б.О., Кошлак Г.В.

## ТЕПЛОФІЗИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ ОБ'ЄМНИХ АМОРФНИХ СТРУКТУР

**Вступ.** Процес формування об'ємного шару з аморфною структурою має ряд труднощів, так як охолодження об'ємного масиву розплавленого металу, на відміну від тонких плівок є процесом, який відрізняється істотною інтенсивністю енергообмінних процесів. Для отримання об'ємних аморфних структур нами була розроблена експериментальна лабораторна установка, на якій досліджували процес отримання об'ємних аморфних структур методом розливання в мідну охолоджувану форму з подачею охолоджених часток (інокуляторів). Сутність технології лиття розплаву в охолоджувану форму з подачею охолоджених часток (інокуляторів) полягає в реалізації внутрішнього тепловідведення та утворенні в розплаві додаткових активних центрів охолодження. Вплив інокуляторів проявляється у збільшенні швидкості та розвитку переважно об'ємного твердіння. Дана технологія відрізняється в основному реалізацією внутрішнього тепловідведення за допомогою локальних теплостоків (інокуляторів). Розробка експериментальних технологій процесу лиття в охолоджувану форму з додаванням інокуляторів вимагає великих витрат часу і матеріальних ресурсів, скоротити які дозволяє застосування методів математичного моделювання та оптимізації. Математичне моделювання процесів тепломасообміну інокуляторів в розплавах дозволить виявити особливості технологічного процесу, та встановити вплив інокуляторів на ступінь аморфізації розплаву.

### Теоретична частина

Розрахунок процесів плавлення частинки металу (інокулятора) в одномірній постановці задачі

### Фізична постановка задачі

Розглянемо процес плавлення твердого інокулятора, що має температуру плавлення  $t_L^T$ , повністю зануреного в розплав металу із заданою температурою  $t_p$ . У реальних умовах початкова температура інокулятора  $t_0$  завжди менше температури затвердіння металу  $t_S^P$  і тому, спочатку на його поверхні утворюється оболонка твердого металу. Подальший хід розплавлення залежить від співвідношення між значеннями температур  $t_L^T$ ,  $t_S^P$ ,  $t_p$  [1]. У I період при зануренні інокулятора в розплав на його поверхні намерзає оболонка твердого металу. Тепло, яке надходить від розплаву шляхом конвекції і затвердіння металу на поверхні, витрачається на прогрівання інокулятора і плавлення оболонки розплаву. Закінчення періоду визначається моментом повного розплавлення оболонки. У II період твердий інокулятор прогрівається до температури плавлення  $t_L^T$  та безпосередньо контактує з рідким розплавом. У III періоді інокулятора починає плавиться, а рідка фаза тіла розчиняється в розплаві.

**Твердіння і плавлення оболонки металевого розплаву на поверхні частинки (інокулятора)**

**Математична модель**

На поверхні інокулятора відбувається намерзання оболонки твердого металу з подальшим розплавленням цієї оболонки. Даний період плавлення описується системою рівнянь теплопровідності для двошарового тіла, яка включає рівняння для матеріалу тіла ( $0 \leq r < R_i$ ) та для оболонки розплаву ( $R_i \leq r < Z_m$ ) при  $\tau > \tau_1 + \tau_2$ :

$$\begin{cases} c_i(t)\rho_i(t)\frac{\partial t_i(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_i(t)\frac{\partial t_i(r,\tau)}{\partial r}\right], 0 \leq r < R_i; \\ c_m(t)\rho_m(t)\frac{\partial t_m(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_m(t)\frac{\partial t_m(r,\tau)}{\partial r}\right], R_i \leq r < Z_m. \end{cases} \quad (1)$$

Граничні умови при  $\tau > \tau_1 + \tau_2$ :

на вісі симетрії тіла ( $r = 0$ ) задана умова симетрії [1]:

$$\frac{\partial t_i(0,\tau)}{\partial r} = 0, \quad (2)$$

на межі розділу матеріалу інокулятора і оболонки розплаву ( $r = R_i$ ) задані граничні умови IV роду:

$$\lambda_i(t)\frac{\partial t_i(R_i,\tau)}{\partial r} = \lambda_m(t)\frac{\partial t_m(R_m,\tau)}{\partial r}, t_i(R_i,\tau) = t_m(R_i,\tau), \quad (3)$$

умова теплообміну на межі намерзла оболонка розплаву–розплав ( $r = Z_m$ ):

$$\begin{aligned} -\rho_m(t)Q_m\frac{dZ_m(\tau)}{d\tau} &= \alpha_m(t_p(\tau)-t_V) - \lambda_m(t)\frac{\partial t_m(Z_m(\tau),\tau)}{\partial r}, \\ t(z(\tau),\tau) &= t_L, \quad 0 \leq z(\tau) \leq z_0, \quad \tau > \tau_2, \quad Z_m(\tau) > R_i, \quad \tau > \tau_1 + \tau_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Початкові умови:

$$\begin{cases} t_i(r,\tau_1) = \phi_i(r,\tau_1), 0 \leq r < R_i; \\ Z_m(\tau_1 + \tau_2) = R_i, \end{cases} \quad (5)$$

де  $\phi_i(r,\tau_1 + \tau_2)$ , є рішенням задачі теплопровідності для матеріалу інокулятора, при  $\tau = \tau_1 + \tau_2$ .

Період 3 закінчується, коли повністю розплавиться оболонка розплаву, намерзла на поверхні тіла. Тривалість третього періоду –  $\tau_3$ .

### Плавлення частинки металу

#### Математична модель

Процес плавлення матеріалу інокулятора починається після прогрівання його поверхні до температури плавлення. Таким чином, вирішується задача теплопровідності для тіла з граничними умовами III роду на зовнішній межі ( $r = Z_i$ ) для розрахункової області. Прогрівання поверхні тіла описується рівнянням теплопровідності для матеріалу інокулятора при  $\tau > \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ :

$$c_i(t)\rho_i(t)\frac{\partial t_i(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_i(t)\frac{\partial t_i(r,\tau)}{\partial r}\right], 0 \leq r < Z_i \quad (6)$$

Граничні умови при  $\tau > \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ :

на вісі симетрії інокулятора ( $r = 0$ ) задано умову симетрії:

$$\frac{\partial t_i(0,\tau)}{\partial r} = 0, \quad (7)$$

умова теплообміну на межі поверхня інокулятора–розплав ( $r = Z_k$ ):

$$\lambda_i(t)\frac{\partial t_i(Z_i,\tau)}{\partial r} = \alpha_m [t_p(\tau) - t_i(Z_i,\tau)], \quad (8)$$

Початкові умови:

$$\begin{cases} t_i(r, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3) = \phi_i(r, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3), 0 \leq r < Z_i; \\ Z_i(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) = R_i, \end{cases} \quad (9)$$

де  $\phi_i(r, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3)$  є рішенням задачі теплопровідності для матеріалу інокулятора, описаної в періоді 3, при  $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ . Тривалість періоду прогрівання поверхні тіла до температури плавлення –  $\tau_4^n$ .

Після прогрівання поверхні тіла починається процес його плавлення, який описується рівнянням теплопровідності для матеріалу злитка (6) при  $\tau > \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4^n$ .

Умова теплообміну на межі поверхня тіла–розплав ( $r = Z_i$ ):

$$-\rho_i(t)Q_i \frac{dZ_i(\tau)}{d\tau} = \alpha_m (t_p(\tau) - t_L^i) - \lambda_i(t) \frac{\partial t_i(Z_i(\tau), \tau)}{\partial r},$$

$$t_i(Z_i(\tau), \tau) = t_L^i, 0 \leq Z_i < R_i, \tau > \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4^n. \quad (10)$$

Початкові умови:

$$t_i(r, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4^n) = \phi_i(r, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4^n), 0 \leq r < Z_i, \quad (11)$$

де  $\phi_i(r, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4^n)$ , є рішенням задачі теплопровідності для матеріалу інокулятора, описаної в періоді прогрівання поверхні матеріалу інокулятора до температури плавлення при  $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4^n$ . Тривалість періоду плавлення матеріалу тіла –  $\tau_4^n$ .

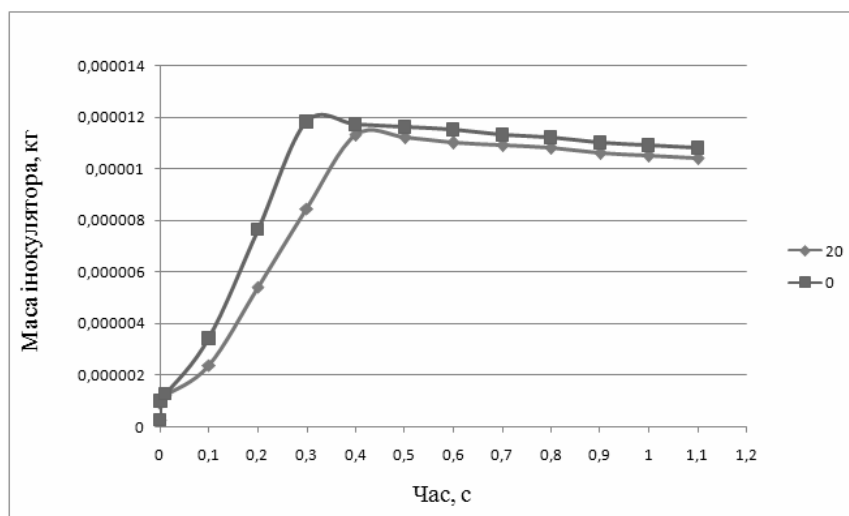
Період 4 вважається закінченим за умови повного розплавлення матеріалу інокулятора. Тривалість четвертого періоду –  $\tau_4 = \tau_4^n + \tau_4^{nn}$ .

Розрахункова модель була виконана із застосуванням мови програмування BASIC, отримані розрахунки дозволили визначити вплив інокуляторів на степінь аморфізації структури. Результати розрахунку у вигляді графіків приведені на рис. 1–2.

В якості модельного сплаву був обраний сплав, який має гарну схильністю до аморфізації, внаслідок вмісту в ньому елементів що легко аморфізуються, таких як Zr, В, Р, Si, що є відомими аморфізаторами [2–3]. В табл. 1 наведені теплофізичні властивості досліджуваного сплаву.

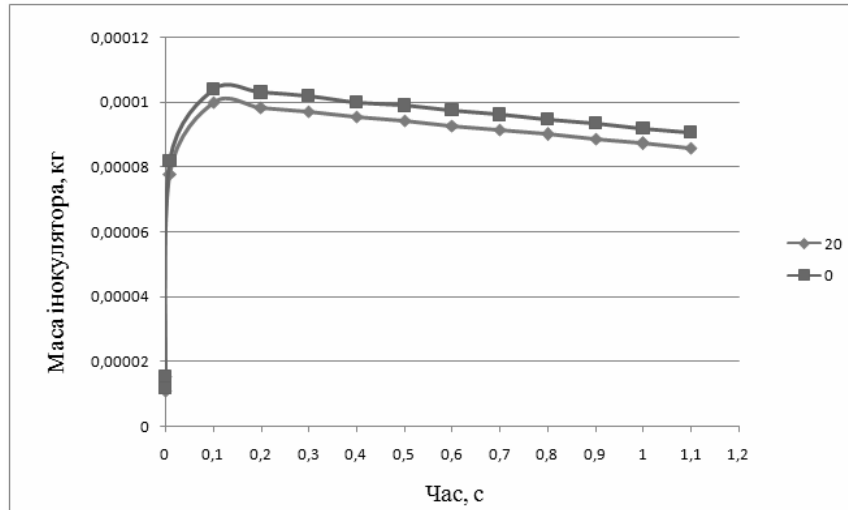
Таблиця 1 – Теплофізичні властивості досліджуваного сплаву

Сплав	Температура плавлення, °С	Температура переходу в аморфний стан, К	Густина сплаву, кг/м <sup>3</sup>	Теплоємність сплаву, Дж/(кг·К)	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К
Cu <sub>45</sub> Ti <sub>35</sub> Zr <sub>20</sub>	1090	410	6900	513,9	175



0–20 – початкова температура інокулятора відповідно 0°C та 20°C

Рисунок 1 – Графік зміни маси інокулятора зі сплаву Cu<sub>45</sub>Ti<sub>35</sub>Zr<sub>20</sub> в процесі плавлення в рідкому розплаві при початковому діаметрі інокулятора 1 мм



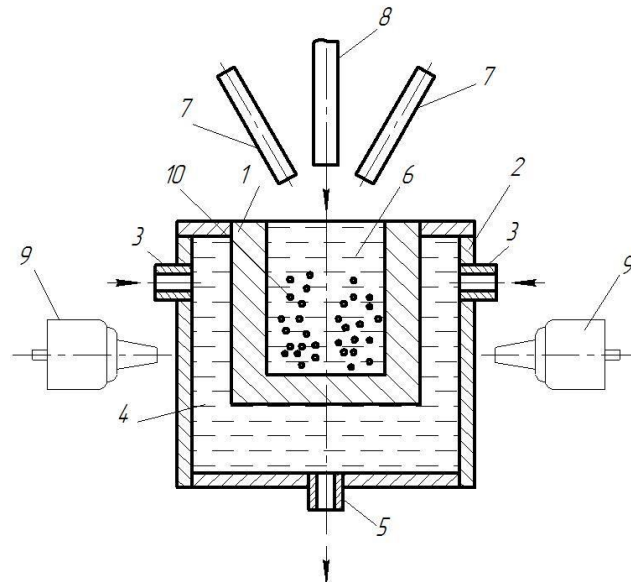
0–20 – початкова температура інокулятора відповідно 0°C та 20°C

Рисунок 2 – Графік зміни маси інокулятора зі сплаву  $\text{Cu}_{45}\text{Ti}_{35}\text{Zr}_{20}$  в процесі плавлення в рідкому розплаві при початковому діаметрі інокулятора 2 мм

### Експериментальна частина

Для вивчення закономірностей формування масивних аморфних структур методом лиття в охолоджувану форму в заводських умовах була розроблена та модифікована установка рис. 3, на якій проводили експериментальні дослідження.

Сутність технології лиття розплаву в охолоджувану форму з подачею охолоджених часток (інокуляторів) полягає в реалізації внутрішнього тепловідведення та утворенні в розплаві додаткових активних центрів охолодження. Вплив інокуляторів проявляється у збільшенні швидкості та розвитку переважно об'ємного затвердіння..

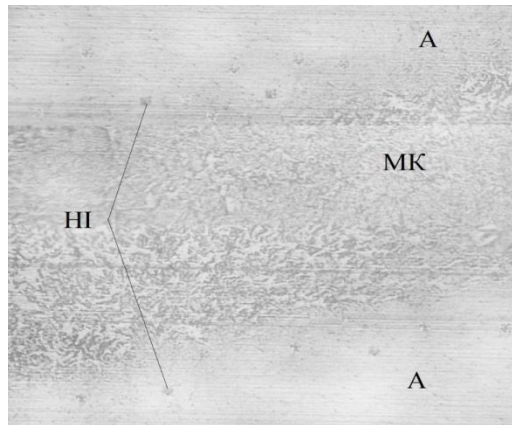


1 – охолоджувана форма, 2 – форма, що обмежує процес, 3 – отвори для подачі охолоджуючої рідини, 4 – вода, 5 – отвір для відведення води, 6 – розплав, 7 – подача охолоджених часток (інокуляторів), 8 – подача розплаву металу, 9 – ультразвуковий випромінювач, 10 – охолоджені частки металу (інокулятори)

Рисунок 3 – Схема лиття металу в охолоджувану форму

У момент контакту твердої частинки інокулятора з рідким металом в розплаві створюється локальне термічне переохолодження навіть у разі значних перегрівів всього обсягу розплаву.

Механічні коливання високої інтенсивності, що створюються випромінювачем поз. 9, індують об'ємні хвилі, які, проходячи крізь стінки конструкції, що обмежує процес поз. 2 та мідну охолоджувану форму поз.1, впливають на розплав, що твердіє. Металофізичні дослідження структури отриманих злитків показані на рис. 4



А – аморфна структура, МК – мікрокристалічна структура  
НІ – не розплавлені інокулятори

Рисунок 4 – Аморфно-мікрокристалічна структура литого металу з вмістом інокуляторів 20...30 % по масі

Для визначення впливу параметрів режиму лиття металу в охолоджувану форму на ступінь аморфізації масивних аморфних структур використовували теорію планування експерименту, обробка експериментальних даних була виконана за методикою планування експерименту другого порядку з ядром  $2^4$ . Графіки обробки експериментальних даних приведені на рис. 5–6.

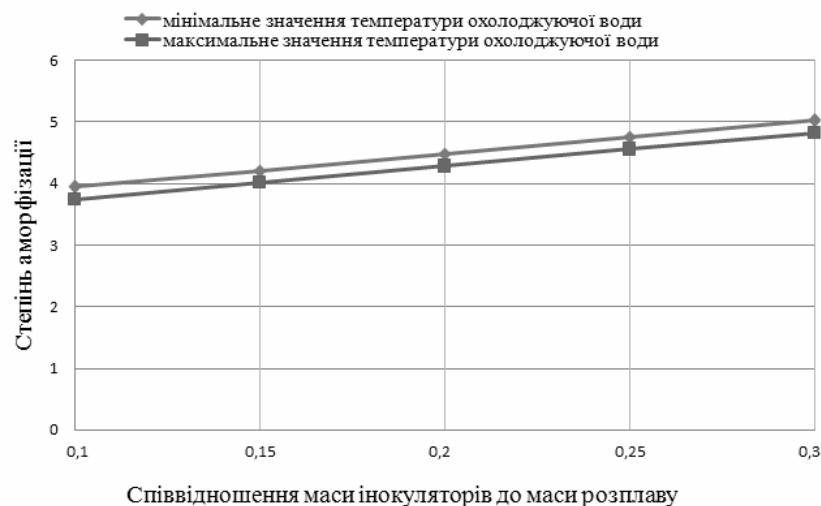


Рисунок 5 – Графік залежності ступеня аморфізації від співвідношення маси інокуляторів до маси розплаву при мінімальному та максимальному значенні температури охолоджуючої води

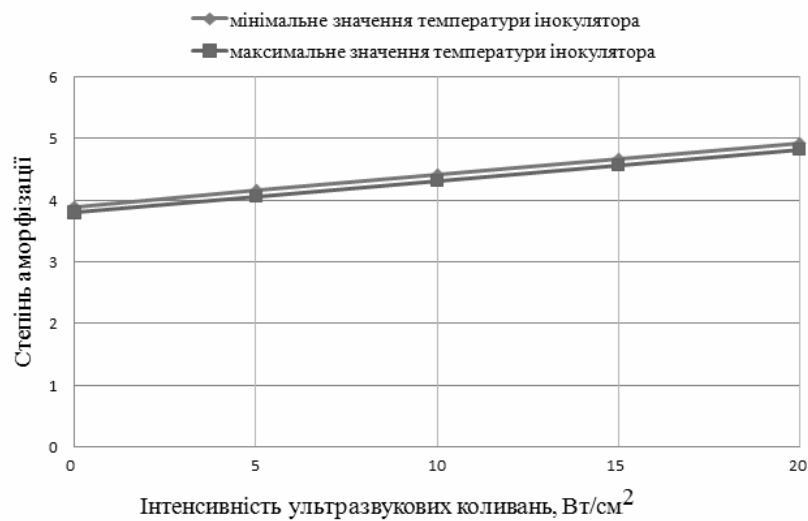


Рисунок 6 – Графік залежності ступеня аморфізації від інтенсивності ультразвукових коливань при мінімальному та максимальному значенні температури інокулятора

Аналіз графіків показує, що найбільше значення для отримання аморфної структури має співвідношення інокуляторів до маси розплаву (фактор  $x_1$ ).

Інокулятори в розплаві відбирають тепло на власне нагрівання та розплавлення, в результаті знижується температура розплаву. Ефект охолодження який вносять інокулятори призводить у результаті до зростання швидкості затвердіння. Зі збільшенням співвідношення маси інокуляторів до маси розплаву швидкість затвердіння зростає.

Інтенсивність ультразвукових коливань, фактор ( $x_2$ ) надає позитивний вплив на формування аморфної структури. У процесі затвердіння розплав металу піддається ультразвуковому впливу, що в свою чергу не дає утворитися кристалічній структурі металу поблизу охолоджуваної стінки форми та межі з охолоджуючим середовищем, а так само призводить до утворення мікрокристалічної структури металу в центральній частині розплаву.

При впливі ультразвукових коливань в процесі затвердіння злитка поліпшується структура і механічні властивості металу. Зі збільшенням інтенсивності ультразвукових коливань в розплаві виникає перемішування, і інтенсифікуються процеси теплообміну, температура в об'ємі розплаву декілька вирівнюється і це призводить до деякого прискорення зняття перегрівання.

## Висновки

1. Додавання інокуляторів призводить до реалізації внутрішнього тепловідведення та утворення в розплаві додаткових активних центрів кристалізації.

2. Вплив інокуляторів проявляється у збільшенні швидкості та розвитку переважно об'ємного затвердіння. Дана технологія відрізняється в основному реалізацією внутрішнього тепловідведення за допомогою локальних теплостоків.

3. Розплав металу з введеними охолодженими частками (інокуляторами) характеризується переохолодженим станом по всьому об'єму злитка, що твердіє. Інокулятори не тільки знімають перегрів, а й переохолоджують розплав.

4. У момент контакту твердої частинки інокулятора з рідким металом в розплаві створюється локальне термічне переохолодження навіть у разі значних перегрівів всього обсягу розплаву.

Література

1. Pavlenko A.M., Usenko B.O., Koshlak H.V. Analysis of thermal peculiarities of alloying with special properties, Metallurgical and Mining Industry, 2014, No2, p.p. 15–20.
2. Pavlenko A.M., Usenko B.O., Koshlak H.V. Mathematical modeling of the casting process in Comsol 3.5a package, Metallurgical and Mining Industry, 2015, No1, p.p. 132–140.
3. Anatoliy Pavlenko, Bohdan Usenko, Investigation thermophysical processes obtaining of massive amorphous structure, The special aspects energy and resource saving, Oradea University Press, 2015, pp. 235–274.

УДК 536.248.2

Павленко А.М., Усенко Б.О., Кошлак А.В.

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ АМОРФНЫХ СТРУКТУР**

В статье приведены результаты исследования теплофизических особенностей получения объемных аморфных структур в металлах и сплавах. Рассмотрены особенности процессов тепломассообмена при образовании в расплаве дополнительных активных центров охлаждения, локальных теплостоков для создания внутреннего теплоотвода. Построена математическая модель плавления инокуляторов в расплавах для оптимизации процесса получения массивных аморфных структур, которая позволяет сократить время экспериментальных исследований и материальные ресурсы.

Pavlenko A., Usenko B., Koshlak A.

**THE THERMOPHYSICAL PECULIARITIES OBTAINING OF VOLUMETRIC AMORPHOUS STRUCTURES**

The article presents the results of research of thermophysical peculiarities obtaining volumetric amorphous structures in metals and alloys. This technology differs mainly the realization internal heat removal by means of local heat sink (inoculator). The peculiarities of processes of heat and mass transfer during the formation of in the melt additional active cooling centers, local heat sink to generate internal heat removal. A mathematical model of melting inoculator in melts for optimizing the process of obtaining massive amorphous structures, which allows to reduce time of experimental research and material resources to create massive amorphous structures. Mathematical modeling of processes heat and mass transfer inoculator in melts allows you to identify peculiarities of the technological process, and establish influence inoculator on the degree of amorphization melt. The results of physical experiments are compared with the results of the calculation. The results can be used to analyze the physical regularities and informed choice of technological modes of formation of massive amorphous structures in different metals and alloys.

The results provide an effective assessment of the intensity of heat transfer during the casting process, which makes it possible to estimate and predict the ability of alloys to the amorphization of the structure.