

Трегубенко Г.В., Меняйло О.В.

Моделювання впливу технологічних факторів на процес утворення газової пористості у відливках з вторинних алюмінієвих сплавів

Tregubenko G.V., Meniailo E.V.

Modeling of the influence of technological factors on the process of gas porosity formation in secondary aluminium alloy castings

Мета. Дослідити вплив різних технологічних факторів на процес газовиділення водню при кристалізації вторинних алюмінієвих сплавів.

Методика. Виконано моделювання процесу утворення газової пористості у відливках із вторинних алюмінієвих сплавів.

Результати. Визначено, що для пізнішого виділення водню в газові бульбашки при затвердінні алюмінію та його сплавів необхідно підвищувати ступінь пересичення твердого металу воднем, зменшувати вихідний вміст водню в розплаві, підвищувати щільність і поверхневий натяг розплаву, збільшувати роботу утворення зародка газової бульбашки. Встановлено, щоб знизити інтенсивність виділення водню в газові бульбашки при затвердінні вторинних алюмінієвих сплавів потрібно зменшувати швидкість кристалізації та ступінь пересичення розплаву воднем.

Наукова новизна. Вперше отримано математичну модель для прогнозування газовиділення водню в процесі затвердіння вторинних алюмінієвих сплавів.

Практична значущість. Результати роботи можна застосовувати при виробництві конструкційних вторинних алюмінієвих сплавів для оптимізації технологічного процесу та мінімізації кількості газових пор та їх розмірів, а також отримання закритої газової пористості навіть після термо- або механічної обробки. Крім того, використання на практиці отриманих виразів дозволяє при отриманні литих алюмінієвих пористих сплавів (газарів) активно керувати процесом газовиділення водню при кристалізації та отримувати відливки з потрібною газовою пористістю.

Ключові слова: алюміній, вторинні алюмінієві сплави, водень, газова пористість, відливка, газовиділення, технологічні фактори, затвердіння.

Purpose. To study the influence of various technological factors on the process of hydrogen outgassing during the crystallization of secondary aluminum alloys.

Methodology. Modeling of the process of gas porosity formation in secondary aluminium alloy castings was performed.

Findings. It is determined that for more recent release of hydrogen into gas bubbles during solidification of aluminum and its alloys it is necessary to increase the level of supersaturation of hard metal with hydrogen, reduce the initial hydrogen content in the melt, increase the density and surface tension of the melt, increase gas bubble formation. It is established that in order to reduce the intensity of hydrogen evolution into gas bubbles during the solidification of secondary aluminum alloys, it is necessary to reduce crystallization rate and level of supersaturation of the melt with hydrogen.

Originality. For the first time, a mathematical model for predicting of hydrogen outgassing during the solidification of secondary aluminum alloys was obtained.

Practical value. The results can be used in the production of structural secondary aluminum alloys in order to optimize the process and minimize the number of gas pores and their size, as well as to obtain a closed gas porosity even after heat or mechanical treatment. In addition, the practical use of the obtained expressions allows during the production of cast porous aluminum alloys (gasars) to actively control the process of hydrogen outgassing during crystallization and to obtain castings with the required gas porosity.

Key words: aluminum, secondary aluminum alloys, hydrogen, gas porosity, casting, outgassing, technological factors, solidification.

Вступ. На даний час алюмінієві сплави, завдяки їх легкості, механічним властивостям, корозійностійкості, технологічності та рециркуваності, знаходять широке застосування у машинобудуванні та інших галузях.

В результаті виплавки та розливки алюміній взаємодіє з різними газами, що є причиною утворення ряду дефектів. Основними з яких є газова пористість та неметалеві включення. Гази, екстраговані з алюмінію, складаються переважно з водню

[1]. Основним джерелом його є атомарний водень, який утворюється при дисоціації водяного пару, адсорбованого з повітря, шихти, стінок тиглю або форми, а також його реакції з алюмінієм [2].

Газова пористість значно погіршує механічні та експлуатаційні властивості алюмінію та його сплавів. Тому мінімізація кількості газових пор та їх розмірів при виробництві конструкційних вторинних алюмінієвих сплавів є дуже важливим та актуальним завданням.

Аналіз літературних даних та постановка проблем. Виникнення газової пористості в алюмінієвих відливках пояснюється різкою зміною розчинності водню при переході алюмінію з рідкого стану у твердий [1]. Тому водень в алюмінієвих сплавах завжди вважався шкідливою домішкою та засобом видалення водню з алюмінієвих розплавів присвячена велика кількість робіт як в Україні [2], так і за її межами [3-5]. Поряд з цим, починаючи з середини XX століття, почали з'являтися публікації, в яких відзначалися ті або інші аспекти позитивного впливу водню на процес формування відливок з алюмінієвих сплавів [6]. Було зазначено, що спливання бульбашок водню при кристалізації сприяють очищенню розплаву від неметалевих включень. Потім почали з'являтися повідомлення, що в деяких випадках газові бульбашки не погіршують, а навпаки, дозволяють покращити механічні та експлуатаційні властивості алюмінієвих сплавів [7]. Підтвердженням цьому стало відкриття нового класу литих пористих сплавів – газарів (газом армований матеріал) [8, 9]. Газари володіють цілим рядом чудових властивостей, у тому разі підвищеною теплоізоляцією, звукопоглинанням, демпфіруванням удару. Вони мають міцність та пластичність, які набагато, перевищують якості раніше відомих пористих матеріалів. Газари застосовуються як фільтри, самозмащувальні підшипники, розпилювачі та змішувачі рідини і газу, тощо.

Таким чином, газовиділення водню при кристалізації алюмінію та його сплавів може як негативно, так і позитивно впливати на процес формування відливок [10]. Так для конструкційних алюмінієвих сплавів наявність газової пористості різко погіршує їх механічні та експлуатаційні властивості та навіть приводить до браку. Для повного або часткового вилучення пористості потрібно провести ряд технологічних заходів [2-5]. Для газарів, навпаки, виділення бульбашок водню при певних умовах формує відливки з потрібною пористою структурою та унікальними експлуатаційними характеристиками [8, 9]. Тому для забезпечення оптимальної структури відливок з алюмінієвих сплавів необхідно знати які фактори та як впливають на процес газовиділення водню.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження впливу різних факторів на процес газовиділення водню при кристалізації вторинних алюмінієвих сплавів.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- Визначити які фактори та як впливають на початок процесу газовиділення водню й утворення газової пористості при кристалізації відливок з вторинних алюмінієвих сплавів.
- Встановити вплив різних факторів на інтенсивність процесу газовиділення і, відповідно, на кількість та розмір газових пор.

Матеріали та методи досліджень. В якості матеріалів досліджень використовувалися вторинні алюмінієві сплави. Методика проведення досліджень базувалася на моделюванні процесу газовиділення водню при кристалізації вторинних алюмінієвих сплавів.

Результати дослідження. При аналізі поведінки водню при кристалізації вторинних алюмінієвих сплавів у роботі [11] показано, що вміст водню в розплаві, що прилегає до міжфазної межі, збільшується по мірі затвердіння:

$$[H]_{\phi.к.} = \frac{([H]_0 - \chi[H]_{me})^2}{(1-\chi)^2[H]_{me}}, \quad (1)$$

де $[H]_{\phi.к.}$ і $[H]_0$ – вміст водню в розплаві на фронті кристалізації та до початку затвердіння, мас. %; χ – частка металу, що закристалізувався; $[H]_{me}$ – розчинність водню у твердому металі при температурі солідусу, мас. %.

При цьому, якщо $[H]_{\phi.к.}$ перевищить межу розчинності водню у рідкому металі ($[H]_{жс}$) на деяке пересичення $[H]_n$, то може початися газоевтектичне перетворення та виникнути утворення нової (третьої) фази – газових бульбашок (рис. 1). На підставі рівняння (1) можна розрахувати критичну частку металу, що закристалізувався ($\chi_{крит}$), при досягненні якої може початися газовиділення на фронті кристалізації:

$$\chi_{крит} = \frac{\sqrt{[H]_{me}([H]_{жс} + [H]_n)} - [H]_0}{\sqrt{[H]_{me}([H]_{жс} + [H]_n)} - [H]_{me}}. \quad (2)$$

Величина пересичення розплаву водню залежить від умов, при яких відбувається утворення бульбашки. Для початку газовиділення необхідно, щоб рівноважний тиск водню на фронті кристалізації перевищив величину протитиску, що перешкоджає утворенню газових бульбашок:

$$\frac{[H]_{\phi.к.}^2}{k_H} > P_{вн} + P_{мет} + P_{кап}, \quad (3)$$

де k_H – константа рівноваги реакції розчинення водню в алюмінії та його сплавах, мас.%/атм.^{0.5}; $P_{вн}$ – зовнішній тиск газової фази, атм.; $P_{мет}$ – металостатичний тиск, атм.; $P_{кап}$ – капілярний тиск, атм.

Враховуючи, що $P_{мет} = \rho_{жс}gh$ и $P_{кап} = \frac{2\sigma}{R}$, умо-
ву початку газоутворення (3) можна представити у вигляді:

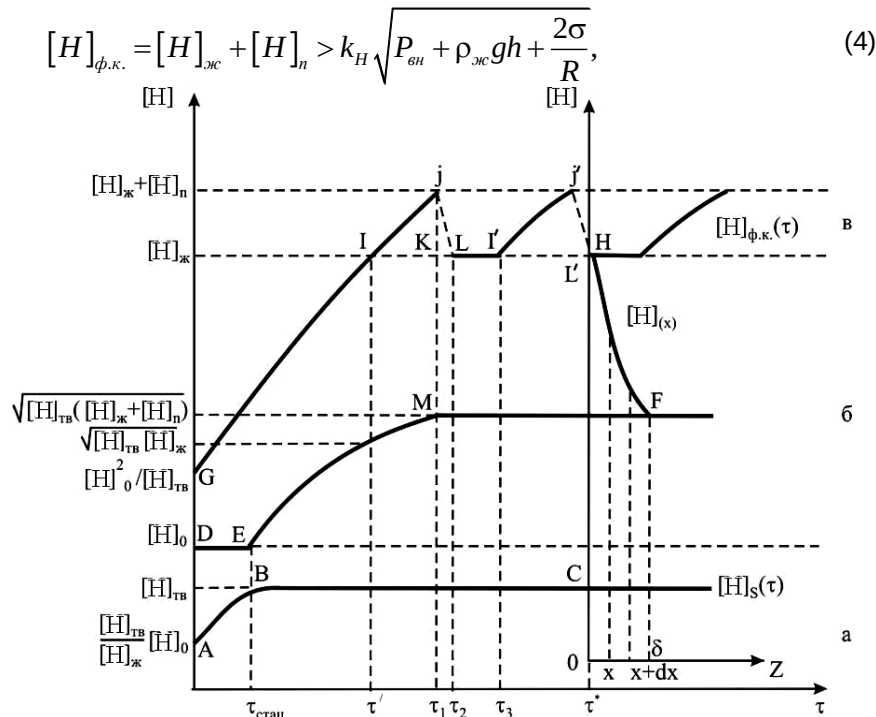


Рисунок 1. Перерозподіл водню між трьома фазами при кристалізації вторинних алюмінієвих сплавів: а – розподіл водню у твердій фазі; б – розподіл водню в рідкій фазі; в – область виділення водню в газові бульбашки:

ABC – зміна вмісту водню у твердій фазі з плином часу; DEF – зміна вмісту водню в обсязі розплаву з плином часу; GJL – зміна вмісту водню в розплаві, що прилягає до фронту кристалізації з плином часу; HF – зміна локальної концентрації водню на відстані x від фронту кристалізації.

де g – прискорення сили тяжіння, $\text{см}/\text{с}^2$; $\rho_{ж}$ – щільність розплаву, $\text{г}/\text{см}^3$; h – висота стовпу рідкого металу над зародком газової бульбашки, см ; σ – коефіцієнт поверхневого натягнення металу, $\text{Н}/\text{см}$; R – радіус зародку, см .
Мінімальне пересичення розплаву воднем, при досягненні якого починається газовиділення, буде дорівнювати:

$$[H]_n^{\min} = [H]_{жс} \left(\sqrt{P_{вн} + \rho_{жс}gh + \frac{2\sigma}{R}} - 1 \right). \quad (5)$$

Підставляючи вираз (4) в (2) отримуємо:

$$\chi_{\text{крит}} = \frac{\sqrt{[H]_{тв} k_H \sqrt{P_{вн} + \rho_{жс}gh + \frac{2\sigma}{R}} - [H]_0}}{\sqrt{[H]_{тв} k_H \sqrt{P_{вн} + \rho_{жс}gh + \frac{2\sigma}{R}} - [H]_{тв}}}. \quad (6)$$

Величину пересичення розплаву воднем, необхідну для початку газовиділення, можна також визначити і через роботу утворення бульбашки [12]:

$$[H]_n = \frac{A}{k^* V_n}, \quad (7)$$

де A – робота утворення газової бульбашки, Дж; k^* – коефіцієнт пропорційності, Дж/(% см^3); V_n – об'єм газової бульбашки, см^3 .

Роботу з утворення газової бульбашки можна визначити, як різницю між кінцевою та початковою потенційною енергією тиску газу та рідини та витратою енергії проти дії сил поверхневого натягнення рідини та адгезії металів, що кристалізуються:

$$A = -(P_z - P_{ж})V_n + \sigma S_n \left[1 - \frac{S_a}{S_n} (1 - \cos \theta) \right], \quad (8)$$

де P_z – тиск газу всередині бульбашки, атм.; $P_{ж}$ – тиск рідини на бульбашку, атм.; θ – крайовий кут; S_a – поверхня дії сил адгезії, см²; S_n – поверхня газової бульбашки, см².

Відповідно до формули (8) бульбашки водню виникають на поверхні твердої фази з найменшою витратою роботи, а отже, з найбільшою ймовірністю, у тих місцях, де відношення S_a/S_n буде найбільшим. При будь-якому значенні крайового куту відношення S_a/S_n буде найбільшим у западинах між зростаючими кристалами при комірково-дендритному фронті кристалізації та на поверхні неметалевих включень, тому саме в цих місцях найбільш вірогідне зародження бульбашок водню.

Кут прямої JL (рис. 1, в) залежить від швидкості утворення бульбашки та за незмінності початкових умов є постійним. Причому, чим менше мінімальні розміри бульбашки $R_n^{\min}$, тим меншим повинен бути час ($\tau = \tau_2 - \tau_1$), що передує його зародженню. Тому, чим більше пересичення воднем розплаву на фронті кристалізації та відношення S_a/S_n , а міжфазне натягнення менше, тим коротше буде час, що передує зародженню бульбашки, а ділянка KL на рис. 1 менше.

Газова бульбашка, що утворилася, спливає не відразу, а може деякий час утримуватися на фронті кристалізації. При цьому, вміст водню в розплаві на міжфазній межі дорівнює $[H]_{ж}$ та не буде збільшуватися на ділянці LI' (рис. 1), так як усі «зайві» атоми водню, що виділились при затвердінні, переходять у газову бульбашку, викликаючи її зростання. Чим довше газова бульбашка утримується на фронті затвердіння, тим ділянка LI' більше.

Коли розмір бульбашки стає таким, що відштовхувальна сила перевищить сили, що утримують його на фронті кристалізації, бульбашка спливає. В роботі [13] на підставі теорії капілярності виводиться наступна формула для діаметра бульбашки, що відривається:

$$D_{omp} = 0,02\theta \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_{ж} - \rho_H}}. \quad (9)$$

Приймаючи до уваги пульсацію $[H]_{ф.к.}$ у трьохфазній зоні (рис. 1, в) слід очікувати постійних змін і вмісту водню в об'ємі розплаву ($[H]_{об}$), що здавалося, повинно було б привести до постійних коливань $[H]_{об}$. Але враховуючи, що на фронті кристалізації відбуваються одночасно, як і локальні пересичення розплаву воднем (лінія IJ), так і утворення газових бульбашок (лінія JL), та їх зростання (лінія LI'), то це призводить до виник-

нення великої кількості локальних дифузійних потоків атомів водню, що спрямовані у різні сторони та які в середньому врівноважують одне одного і не призводять до змін $[H]_{об}$.

У роботі [12] була отримана формула для визначення часу $\tau_{p.n.} = \tau_3 - \tau_2$ (рис. 1), відповідного зростання бульбашки на міжфазній межі:

$$\tau_{p.n.} = \frac{R_{np.n.}^2 - R_n^{\min^2}}{2D_H [H]_n} [H]_{нuz}, \quad (10)$$

де $\tau_{p.n.}$ – час зростання газової бульбашки, с; $R_{np.n.}$ – граничний розмір бульбашки, що знаходиться на фронті кристалізації, см; $[H]_{нuz}$ – концентрація водню у бульбашці (у нашому випадку ~ 100 %).

У цій же роботі приводяться конкретні значення часу зростання газової бульбашки. Так при $R_n = 0,01$ см воно становить від 0,5 до 3,1 с, а при 0,05 см – 13,2...78 с, відповідно.

Необхідно відзначити, що за формулою (10) можна визначити час життя тільки одної газової бульбашки, але реально на межі поділу фаз зароджується, зростає та відривається велика кількість бульбашок. Тому одним з важливих параметрів, що характеризують перерозподіл водню між трьома фазами при кристалізації вторинних алюмінієвих сплавів, є інтенсивність виділення водню у газові бульбашки. Інтенсивність газозвиділення можна визначити за формулою:

$$I_{H_2} = \frac{dV_H^g}{d\tau} = \frac{1}{\rho_H} \frac{dM_H^g}{d\tau}, \quad (11)$$

де I_{H_2} – інтенсивність виділення водню у газові бульбашки, см³/с; V_H^g і M_H^g – обсяг та маса водню, що виділився, відповідно, см³ і г; ρ_H – щільність водню, г/см³.

Як вже відзначалося вище, маса водню, що виділився у газові бульбашки, дорівнює масі водню, що перейшов з закристилизованого металу на фронт кристалізації:

$$M_H^g = \frac{M_{закр}}{100\%} ([H]_{об}^{\max} - [H]_{me}) = \frac{\rho_{me} V_{закр}}{100\%} ([H]_{об}^{\max} - [H]_{me}), \quad (12)$$

де $[H]_{об}^{\max}$ – максимальний вміст водню в обсягу розплаву, по досягненні якого на фронті кристалізації починають відділятися бульбашки, мас. %; $M_{закр}$ і $V_{закр}$ – маса і обсяг металу, що закристилізувався, відповідно, г і см³.

Максимальний вміст водню в об'ємі розплаву, який відповідає початку газозвиділення (рис. 1, б, точка М), можна розрахувати за рівнянням, отриманим у роботі [11]:

$$[H]_{ф.к.} = \frac{[H]_{об.}}{\kappa}, \quad (13)$$

$$\kappa = \frac{[H]_{ме}}{[H]_{об}} = \frac{[H]_{ме} (1 - \chi)}{[H]_0 - \chi [H]_{ме}}, \quad (14)$$

де κ – ефективний коефіцієнт розподілу водню.

$$I_{H_2} = \frac{\rho_{ме}}{\rho_H 100\%} \left(\sqrt{[H]_{ме} ([H]_{жс} + [H]_n)} - [H]_{ме} \right) \frac{dV_{закр}}{d\tau}. \quad (16)$$

Враховуючи, що похідна за часом обсягу металу, що закристалізовався, є не що інше, як об'ємна швидкість затвердіння ($v_{об.кр.}$), одержимо

$$I_{H_2} = \frac{\rho_{ме} [H]_{ме} v_{об.кр.}}{\rho_H 100\%} \left(\sqrt{\frac{([H]_{жс} + [H]_n)}{[H]_{ме}}} - 1 \right). \quad (17)$$

Обговорення результатів. Дане дослідження є логічним продовженням раніше проведеного нами моделювання поведінки водню при кристалізації вторинних алюмінієвих сплавів (див. [11]). На підставі отриманих у роботі виразів можна досить просто визначити вплив різних технологічних та фізико-хімічних параметрів процесу виробництва відливки з вторинних алюмінієвих сплавів (швидкості кристалізації, початкового вмісту водню у розплаві, ступеня пересичення твердого розчину, величини зовнішнього тиску газової фази, тощо) на початок та інтенсивність протікання газовиділення при затвердінні металу. Застосування на практиці встановлених залежностей дає можливість активно керувати процесом газовиділення водню при кристалізації вторинних алюмінієвих сплавів та отримувати відливки з оптимальною газовою пористістю.

Висновки. В результаті проведених досліджень:

1. Визначено, що для більш пізнього виділення водню у газові бульбашки при затвердінні алюмінію та його сплавів необхідно підвищувати ступінь пересичення твердого металу воднем (збільшуючи зовнішній тиск газової фази та швид-

Приймаючи до уваги, що $[H]_{ф.к.}^J = [H]_{жс} + [H]_n$, отримаємо:

$$[H]_{об}^{max} = \sqrt{[H]_{ме} ([H]_{жс} + [H]_n)}. \quad (15)$$

Тепер підставимо рівняння (15) у (12), а потім вираз, який отримали – в (11), вважаючи $[H]_n$, незалежним від часу:

остаточну формулу для визначення інтенсивності газовиділення:

кість кристалізації, шляхом введення гідридоутворюючих елементів, тощо), зменшувати початковий вміст водню у розплаві (здійснюючи дегазацію тим чи іншим способом), підвищувати щільність та поверхневе натягнення розплаву, збільшувати роботу утворення зародку газової бульбашки (застосовуючи фільтрацію).

2. Встановлено, що для зниження інтенсивності виділення водню в газові бульбашки при затвердінні вторинних алюмінієвих сплавів необхідно зменшувати швидкість кристалізації та ступінь пересичення розплаву воднем.

3. Застосування на практиці отриманих виразів дозволяє:

- при виробництві конструкційних вторинних алюмінієвих сплавів оптимізувати технологічний процес з метою мінімізації кількості газових пор та їх розмірів, а також отримання закритої газової пористості навіть після проведення термо- або механічної обробки;

- при отриманні литих пористих алюмінієвих сплавів (газарів) активно керувати процесом газовиділення водню при кристалізації та отримувати відливки з необхідною газовою пористістю.

Бібліографічний опис

1. Zhang, Q. Microporosity formation and dendrite growth during solidification of aluminum alloys: Modeling and experiment / Q. Zhang, D. Sun, S. Pan, M. Zhu // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – vol.146. - DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118838.
2. Нестеренко, Т.М. Виробництво алюмінієвих сплавів з рудної та вторинної сировини: навчальний посібник / Т.М. Нестеренко, О.М. Нестеренко, Г.О. Колобов, В.П. Грицай. – К.: Вища школа, 2007. – 207 с.
3. Zhao, L. Degassing of aluminum alloys during re-melting / L. Zhao, Y. Pan, H. Liao, Q. Wang // Materials Letters. – 2012. - vol. 66, release 1. – P. 328 – 331. – DOI 10.1016/j.matlet.2011.09.012.
4. Abramov, V.O. Pores-free aluminium alloy by efficient degassing ultrasonic treatments / V.O. Abramov, A.V. Abramova, V.M. Bayazitov et al. // Applied Acoustics. – 2021. - vol. 184. – DOI 10.1016/j.apacoust.2021.108343.
5. Lazaro-Nebreda, J. Improved degassing efficiency and mechanical properties of A356 aluminium alloy castings by high shear melt conditioning (HSMC) technology / J. Lazaro-Nebreda, J.B. Patel, Z. Fan // Journal of Materials Processing Technology. - 2021. – vol. 294, August. – DOI 10.1016/j.jmatprotec.2021.117146.

6. Афанасьев, В.К. Водород и свойства сплавов алюминия с кремнием / В.К. Афанасьев, И.Н. Афанасьева, М.В. Попова. – Абакан: Хакаское изд-во, 1998. – 192 с.
7. Котляровский, Ф.М. Влияние водородной обработки силуминовых расплавов на механические свойства отливок / Ф.М. Котляровский, Г.П. Борисов, В.И. Белик и др. // Процессы литья. – 2004. – № 2. – С. 56-61.
8. Shapovalov, V. Gasar - A new class of porous materials / V. Shapovalov, L. Boyko // *Advanced Engineering Materials*. – 2004. – vol. 6, release 6. – P. 407 – 410. – DOI 10.1002/adem.200405148.
9. Shapovalov, V.I. Hydrogen technology for porous metals (Gasars) production / V.I. Shapovalov, J.C. Withers // *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. – 2008. – vol. Part F2. – P. 29-51. – DOI 10.1007/978-1-4020-8898-8_4.
10. Котляровский, Ф.М. О двойственной роли водорода в процессах формирования отливок из алюминиевых сплавов / Ф.М. Котляровский, Г.П. Борисов // Тр. ФТИМС НАНУ «50 лет в Академии наук Украины: ИЛП, ИПЛ, ФТИМС» – К.: Процессы литья, 2008. – С. 425 - 461.
11. Трегубенко, Г.В. Аналіз поведінки водню при кристалізації вторинних алюмінієвих сплавів / Г.В. Трегубенко, О.В. Меньяло // Теорія і практика металургії. – 2021. – № 1.- С. ?
12. Karagadde, S. A model for growth and engulfment of gas microporosity during aluminum alloy solidification process / S. Karagadde, S. Sundarraj, P. Dutta // *Computational Materials Science*. – 2012. – vol. 65. – P. 383-394. – DOI 10.1016/j.commatsci.2012.07.045.
13. Sun, D. Lattice Boltzmann modeling of bubble formation and dendritic growth in solidification of binary alloys / D. Sun, M. Zhu, J. Wang, B. Sun // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. – vol. 94. – P. 474-487. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.11.079.

References

1. Zhang, Q. Microporosity formation and dendrite growth during solidification of aluminum alloys: Modeling and experiment / Q. Zhang, D. Sun, S. Pan, M. Zhu // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – vol.146. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118838.
2. Nesterenko, T.M. Virobnitstvo alyuminievih splaviv z rudnoyi ta vtorinnoyi sirovini: navchalniy posibnik / T.M. Nesterenko, O.M. Nesterenko, G.O. Kolobov, V.P. Gritsay. – К.: Vischa shkola, 2007. – 207 S.
3. Zhao, L. Degassing of aluminum alloys during re-melting / L. Zhao, Y. Pan, H. Liao, Q. Wang // *Materials Letters*. – 2012. – vol. 66, release 1. – P. 328 – 331. – DOI 10.1016/j.matlet.2011.09.012.
4. Abramov, V.O. Pores-free aluminium alloy by efficient degassing ultrasonic treatments / V.O. Abramov, A.V. Abramova, V.M. Bayazitov et al. // *Applied Acoustics*. – 2021. – vol. 184. – DOI 10.1016/j.apacoust.2021.108343.
5. Lazaro-Nebreda, J. Improved degassing efficiency and mechanical properties of A356 aluminium alloy castings by high shear melt conditioning (HSMC) technology / J. Lazaro-Nebreda, J.B. Patel, Z. Fan // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2021. – vol. 294, August. – DOI 10.1016/j.jmatprotec.2021.117146.
6. Afanasev, V.K. Vodorod i svoystva splavov alyuminiya s kremniem / V.K. Afanasev, I.N. Afanaseva, M.V. Popova. – Abakan: Hakasskoe izd-vo, 1998.- 192 s.
7. Kotlyarovskiy, F.M. Vliyanie vodorodnoy obrabotki siluminovyih rasplavov na mehanicheskie svoystva otlivok / F.M. Kotlyarovskiy, G.P. Borisov, V.I. Belik i dr. // *Protsessyi litya*. – 2004. – № 2. – С. 56-61.
8. Shapovalov, V. Gasar - A new class of porous materials / V. Shapovalov, L. Boyko // *Advanced Engineering Materials*. – 2004. – vol. 6, release 6. – P. 407 – 410. – DOI 10.1002/adem.200405148.
9. Shapovalov, V.I. Hydrogen technology for porous metals (Gasars) production / V.I. Shapovalov, J.C. Withers // *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. – 2008. – vol. Part F2. – P. 29-51. – DOI 10.1007/978-1-4020-8898-8_4.
10. Kotlyarovskiy, F.M. O dvoystvennoy roli vodoroda v protsessah formirovaniya otlivok iz alyuminievih splavov / F.M. Kotlyarovskiy, G.P. Borisov // Тр. FTIMS НАНУ «50 лет в Академии наук Украины: ИЛП, ИПЛ, FTIMS» – К.: Протсессы литья, 2008. – С. 425 - 461.
11. Tregubenko, G.V. Analiz povedinki vodnyu pri kristalizatsiyi vtorinnih alyuminievih splaviv / G.V. Tregubenko, O.V. Menyaylo // *Teoriya i praktika metalurgiyi*. – 2021. – № 1.- С. ?
12. Karagadde, S. A model for growth and engulfment of gas microporosity during aluminum alloy solidification process / S. Karagadde, S. Sundarraj, P. Dutta // *Computational Materials Science*. – 2012. – vol. 65. – P. 383-394. – DOI 10.1016/j.commatsci.2012.07.045.
13. Sun, D. Lattice Boltzmann modeling of bubble formation and dendritic growth in solidification of binary alloys / D. Sun, M. Zhu, J. Wang, B. Sun // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. – vol. 94. – P. 474-487. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.11.079.