

СКІДІН І. Е., САЙТГАРЕЄВ Л. Н., ЧУБЕНКО В. А., ЄВТУШЕНКО С. Д., МІШИН М. М.

АНАЛІЗ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОЧАСОВОЇ ОБРОБКИ АЛЮМІНІЄВИХ РОЗПЛАВІВ

У сучасному ливарному виробництві при отриманні виливків з алюмінієвих сплавів широко використовуються вторинні матеріали – відходи, повернення, брухт. При цьому вміст лому і відходів виробництва в шихті може становити до 100 %. Тому необхідно застосовувати більш досконалі способи плавки і обробки сплавів, у тому числі і раціональні температурні режими лиття. Для поліпшення структури і механічних властивостей багатьох ливарних алюмінієвих сплавів регулюють режими плавки і заливки, застосовують операції модифікування, рафінування, обробку фізичними впливами, створюють особливі умови кристалізації виливків. Наукова новизна роботи полягає у встановлених закономірностях впливу параметрів термочасової обробки розплаву на механічні властивості і якісні показники виливків з алюмінієвих сплавів, отриманих способом ЛГМ, при використанні до 90 % вторинних матеріалів в шихті. Практичне значення роботи полягає в обґрунтуванні можливості підвищення механічних властивостей сплавів, отриманих з переважанням вторинних матеріалів в шихті, а також якісних показників виливків завдяки оптимальним температурам перегріву та лиття. Результати. Визначено раціональні параметри термочасової обробки алюмінієвих розплавів ($T_{\text{ПЕР}} = 990 \dots 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\tau = 5 \dots 10 \text{ хв}$) з вмістом у шихті 85...90 % вторинних матеріалів, які забезпечують задовільну чистоту поверхні, розмірну точність, мінімальну пористість, підвищений рівень механічних властивостей і герметичність виливків, отриманих методом ЛГМ.

Ключові слова: виливок, алюмінієвий розплав, термочасова обробка, вторинні матеріали, пористість, механічні властивості

SKIDIN I., SAITGAREYEV L., CHUBENKO V., EVTUSHENKO S., MISHYN M. OPTIMAL PARAMETERS OF HEAT AND TIME TREATMENT OF ALUMINUM MELTS

In modern foundry production, secondary materials such as waste, returns, and scrap are widely used to produce aluminium alloy castings. Therewith, the scrap and production waste content in the charge can be up to 100%. Therefore, it is necessary to apply more advanced methods of melting and processing alloys, including rational casting temperature conditions. Melting and pouring modes are regulated, and modification, refining, physical treatment, and special conditions for casting crystallisation are used to improve the structure and mechanical properties of many casting aluminium alloys. The scientific novelty of the paper lies in the established regularities of the influence of melt heat treatment parameters on the mechanical properties and quality indicators of castings from aluminium alloys produced by the LFC method, using up to 90 % of secondary materials in the charge.

The practical importance of the study is in substantiating the possibility of improving the mechanical properties of alloys obtained with a predominance of secondary materials in the charge, as well as the quality of castings due to optimal overheating and casting temperatures. Results. The rational parameters of thermal time treatment of aluminium melts ($T_{\text{Overheat}} = 990 \dots 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\tau = 5 \dots 10 \text{ min}$) with the content of 85...90 % of secondary materials in the charge have been determined, which provide satisfactory surface cleanliness, dimensional accuracy, minimal porosity, increased mechanical properties and tightness of castings obtained by the LFC method. **Keywords:** casting, aluminium melt, heat treatment, secondary materials, porosity, mechanical properties

Вступ. Найбільш простим способом обробки розплавів є його температурна обробка. У загальному випадку під температурною обробкою розплаву слід розуміти перегрів вище температури ліквідус до або вище критичних температур, а також витримку при цих температурах, в результаті чого відбуваються структурні перебудови елементів розплаву. Проте, підвищення температури розплаву призводить до інтенсивного окиснення, яке залежить від складу шихтових компонентів, а отже й стримує широке застосування даного підходу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Слід зазначити, що мікронеоднорідність розплавів обумовлена термічно стійкими мікрогрупуваннями або кластерами, успадкованими від структури шихтових матеріалів [1-3], Також, згідно [4, 5] перегрів є важливим чинником, що визначає процес кристалізації і впливає на мікроструктуру і механічні властивості виливків, при чому це пояснювалося тим, що збільшення вихідного перегріву металевого розплаву посилює переохолодження при кристалізації.

Таким чином, застосування високотемпературних перегрівів з оптимальними температурами плавлення при використанні в складі шихти підвищеної кількості вторинних матеріалів сприяє зменшенню рівня мікронеоднорідності розплавів та отримання алюмінієвих виливків з необхідним комплексом властивостей.

Особливо широко температурна обробка застосовується щодо отримання виливків з силумінів, при цьому спостерігається підвищення властивостей в литому стані [6-9]. Наприклад, перегрів сплаву АК7 до 850...900 °С, а потім охолодження його до 700 °С перед заливкою у металеву форму призвело до значного зниження газової пористості у виливках, подрібнення зерна, підвищення механічних властивостей на 20 % [3].

Технології, засновані на температурній обробці розплавів, вимагають значних витрат електроенергії, застосування складного та дорогого обладнання, але при цьому вони дозволяють використовувати при плавці до 100 % вторинних матеріалів в шихті, дають задовільні показники розмірів подрібнення зерна і збільшення центрів кристалізації порівняно зі способами домішкового модифікування [10, 11].

Будучи ефективною і доступною, температурна обробка отримує останнім часом все більший розвиток. Тому дослідження механічних властивостей та якісних показників виливків з алюмінієвих сплавів, отриманих з використанням підвищеної кількості вторинних матеріалів в шихті, при змінних температурних параметрах плавки і лиття, є актуальними та перспективними.

Мета дослідження - визначити механічні властивості, герметичність та якісні показники виливків із алюмінієвих сплавів, отриманих способом лиття за газифікованими моделями (ЛГМ), при змінних температурних параметрах плавки і лиття та підвищеним вмістом вторинних матеріалів в шихті.

© І. Е.Скідін, Л. Н.Сітгарєєв, В. А.Чубенко, С. Д.Євтушенко, М. М. Мішин, 2025

Методи дослідження. Проведені дослідження базуються на стандартних сучасних методах визначення хімічного складу, механічних властивостей силумінів (ДСТУ 2839-94), герметичності та пористості виливків

Викладення матеріалу та результати. Термочасова обробка розплаву надає ефективний модифікуючий вплив на алюмінієві сплави і дозволяє отримати дрібнозернисту структуру і підвищені механічні властивості виливків.

Ефект термочасової обробки пов'язаний з тим, що швидкість структурних перетворень в рідкій фазі досить низька, незважаючи на порівняно великі швидкості процесів дифузії, тому швидке охолодження розплаву може значною мірою пригнічувати трансформацію кластерів.

Швидке охолодження розплаву при реалізації термочасової обробки можна досягати довалкою у розплав, наприклад, подрібнених чушkových сплавів відповідно до заданого хімічного складу литого сплаву. Дані добавки чинять модифікуючий ефект, вносячи мікронеоднорідності менших масштабів і активовані нерозчинні домішки, які є потенційними центрами кристалізації.

Необхідну кількість добавок твердої шихти для охолодження від температури перегріву до необхідної температури лиття визначалася експериментально, при цьому швидкість охолодження мала становити приблизно $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

Програма проведення термочасової обробки розплаву при реалізації даної ресурсозберігаючої технології приведена на рис.1.

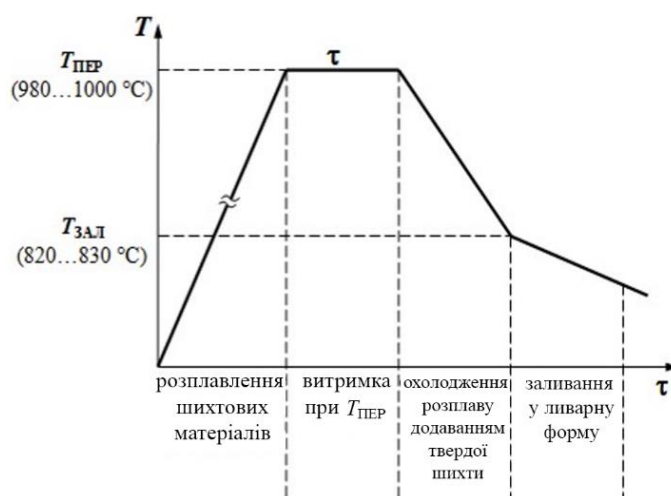


Рис. 1– Програма проведення термочасової обробки розплаву при отриманні алюмінієвих виливків

У ході досліджень було проведено визначення раціональних температурно-часових параметрів термочасової обробки (температури перегріву і часу витримки розплаву) шляхом дослідження якісних показників зразків (табл. 1). Дослідні плавки проводилися в печах ICT-0,06. В усіх експериментах температура заливки ($T_{ЗАЛ}$) становила $820...830\text{ }^{\circ}\text{C}$, що зумовлено повною деструкцією поліестіролової моделі. Охолодження розплавів до $T_{ЗАЛ}$ з температури перегріву здійснювалося внесенням дрібного чушкового сплаву відповідного складу. Рафінування здійснювали при заливці в ливарну форму через фільтр СРФ-0,6.

Чистота поверхні виливків оцінювалась візуально, порівнянням з еталоном. Зразки, що мають дефекти, порівнювались з допустимими дефектами, зазначеними в технічних умовах. Розмірна точність перевірялась за ливарними кресленнями, на яких вказані розміри, що підлягають контролю. Механічні властивості і пористість визначалися на стандартних зразках згідно з ГОСТ 1583-93. Герметичність досліджувалася за критеріями гідроміцності за такою методикою: в зразок під тиском, створюваним гідропресом, подавалася вода; при появі течі реєструвався тиск, який й був критерієм оцінки герметичності зразка.

Якщо в серії експериментів з тими самими параметрами 10% зразків не задовольняли тому чи іншому показнику, то варіант перегріву і заливки вважався неефективним для даної технології. Якщо в якому-небудь варіанті в будь-якій серії спостерігалася недостатня пропалюваність пінополіестіролу, то варіант технології відносили до неефективних. Крім того, якщо в якому-небудь варіанті в будь-якій серії з випадкової вибірки з придатних зразків хоча б один мав бал пористості вище 3-го (визначений за методикою ВІАМ згідно ДСТУ 1583-93), то цей варіант технології також вважався неефективним.

Результати дослідження впливу температурно-часових параметрів плавки при реалізації термочасової обробки на якісні показники зразків (чистота поверхні, розмірна точність, пористість) з алюмінієвих сплавів АК7, АК12, АК9М2 показали, що при вмісті в шихті до 90 % вторинних матеріалів ефективність технології обробки забезпечується значенням температури перегріву $T_{ПЕР} = 990...1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, і раціональним часом витримки $\tau = 5...10\text{ хв}$. Температура перегріву $880...890\text{ }^{\circ}\text{C}$ або $940...950\text{ }^{\circ}\text{C}$ є недостатньою для зниження рівня мікронеоднорідності розплаву і отримання якісного лиття.

Таблиця 1. - Вплив перегріву та витримки на якісні показники виливків

Тпер, °С	τ, мін.	Якісні показники зразків		Пористість	Ефективність програми обробки ²
		Чистота поверхні ¹	Розмірноточність ¹		
Сплав АК7					
1040 1050...	0	–	+	немає	–
	5	+	+	немає	+
	10	–	+	є	–
	15	–	–	є	–
990...1000	0	–	–	немає	–
	5	+	+	немає	+
	10	+	+	немає	+
	15	–	+	є	–
940...950	0	+	–	немає	–
	5	–	+	немає	–
	10	+	+	є	–
	15	+	+	є	–
880...890	0	–	–	є	–
	5	–	–	є	–
	10	–	–	є	–
	15	–	+	є	–
Сплав АК12					
1040...1050	0	–	+	немає	–
	5	+	+	є	–
	10	–	–	є	–
	15	–	–	є	–
990...1000	0	+	–	немає	–
	5	+	+	немає	+
	10	+	+	немає	+
	15	+	+	є	–
940...950	0	+	–	немає	–
	5	+	–	немає	–
	10	–	+	немає	–
	15	–	+	є	–
880...890	0	–	–	є	–
	5	–	–	є	–
	10	–	–	є	–
	15	–	–	є	–
Сплав АК9М2					
1040..1050	0	+	–	немає	–
	5	+	+	немає	+
	10	+	+	є	–
	15	+	–	є	–
990...1000	0	–	+	немає	–
	5	+	+	немає	+
	10	+	+	немає	+
	15	+	+	немає	+
940...950	0	–	+	немає	–
	5	+	–	немає	–
	10	+	–	є	–
	15	+	+	є	–
880...890	0	–	–	є	–
	5	–	–	є	–
	10	+	–	є	–
	15	+	–	є	–

¹ «+» – задовільна; «–» – незадовільна;² «+» – ефективна; «–» – неефективна.

Вплив технології термочасової обробки при зазначених параметрах на чистоту поверхні, розмірну точність, механічні властивості і герметичність зразків із сплавів АК7, АК12, АК9М2 показано в табл. 2. Також в ній наведено механічні властивості виливків, отриманих за існуючою технологією плавки (з вмістом у шихті не більше 35...40 % вторинних матеріалів), яка полягала в тому, що високотемпературний перегрів не проводили, а перегрівали розплави тільки до 880...890 °С, при цьому до температури лиття (820...830°С) розплав охолоджувався разом із піччю.

Таблиця 2. - Вплив оптимальних параметрів термочасової обробки на якісні показники виливків

Сплав	Виливок	Умови плавки та обробки	Властивості виливків					
			Пористість, бал	Чистота поверхні ¹	Розмірна точність ¹	σ _в , МПа	δ, %	Герметичність, МПа
АК7	Корпус	Існуючі	4 - 5	–	+	174...185	2,2...2,6	11,0
		Пропоновані	3	+	+	203...210	3,3...3,5	12,3
АК12	Корпус	Існуючі	4 - 5	–	+	181...190	4,1...4,5	12,2
		Пропоновані	3	+	+	214...220	6,7...7,2	14,0
АК9М2	Вкладиш	Існуючі	3 - 4	+	–	200...207	1,5...1,8	13,3
		Пропоновані	2 - 3	+	+	227...233	2,1...2,3	15,2

¹ «+» – задовільна; «–» – незадовільна.

Згідно табл. 2, механічні властивості виливків після термочасової обробки, порівняно з виливками, отриманими за існуючою технологією, покращуються:

- для виливка «Корпус» зі сплаву АК7 часовий опір розриву σ_в – на 13,5...16,7 %, відносне подовження δ – на 35...50 %; герметичність – на 11,8 %;
- для виливків «Корпус» зі сплаву АК12 σ_в – на 15,8...18,2 %, δ – на 60...63 %; герметичність – на 14,8 %;
- для виливків «Вкладиш» зі сплаву АК9М2 σ_в – на 12,6...13,5 %, δ – на 28...40 %; герметичність – на 14,3 %.

Впровадження розробленої ресурсозберігаючої технології при виплавці сплавів АК7, АК12, АК9М2 з застосуванням термочасової обробки (при 85...90 % вторинних матеріалів в шихті) і виготовленні високоякісних герметичних виливків способом ЛГМ дозволить за рахунок зниження витрат чушкових матеріалів отримати економічний ефект.

Проте, недоліком технології є те, що раціональні режими перегріву і кількість доданої твердої дрібнозернистої шихти необхідно визначати експериментально в кожному конкретному випадку виробництва. Крім того, не всі плавильні агрегати, що застосовуються при виробництві алюмінієвих розплавів, можуть забезпечити необхідні температури перегріву розплаву.

У табл. 3 наведено порівняльну ефективність пропонованої технології обробки з іншими ресурсозберігаючими технологіями. Аналіз усіх представлених технологій обробки розплавів показує задовільні показники приросту механічних властивостей виливків, виготовлених за газифікованими моделями при використанні термочасової обробки розплаву в порівнянні з литтям в кокіль і, як висновок – перспективність застосування даної технології.

Таблиця 3. - Порівняння пропонованої технології термочасової обробки з іншими

Відомості про технологію	Сплав	Вміст в шихті вторинних матеріалів, %	Виливок, метод лиття	Приріст механічних властивостей виливків порівняно з існуючою технологією	
				σ _в , МПа	δ, %
$T_{\text{ПЕР}} = 990...1000^{\circ}\text{C}$, $\tau = 5...10$ хв + заливка через СРФ-0,6 (пропонована)	АК7	85...90	«Корпус», ЛГМ,	16...20	50...60
$T_{\text{ПЕР}} = 1000...1020^{\circ}\text{C}$, $\tau = 10...12$ хв, рафінування 0,2 % MnCl ₂	АК7ч	75...90	«Корпус», кокіль,	10...20	85...110
$T_{\text{ПЕР}} = 1030...1050^{\circ}\text{C}$, $\tau = 10...12$ хв, модифікування 0,1 % Si-Ba	АК7ч	80...85	«Корпус», кокіль,	7...22	80...125
$T_{\text{ПЕР}} = 990...1000^{\circ}\text{C}$, $\tau = 8...10$ хв, рафінування 0,8 % флюсу	АК7ч	80...85	«Корпус», кокіль,	11...19	95...115
$T_{\text{ПЕР}} = 1010...1020^{\circ}\text{C}$, $\tau = 10$ хв	АК7ч	80...85	«Корпус», «Колесо насосне» кокіль,	13...22	90...119
$T_{\text{ПЕР}} = 1000...1020^{\circ}\text{C}$, $\tau = 8...10$ хв, рафінування 0,8 % флюсу	АК7ч	70...85	«Крон-штейн», кокіль	15...23	96...122

Таким чином, була розроблена ресурсозберігаюча технологія отримання алюмінієвих сплавів для корпусного тонкостінного лиття за газифікованими моделями, що включає термочасову обробку розплаву. Технологія сприяла підвищенню рівня механічних властивостей виливків при переважанні вторинних матеріалів в шихті.

Висновки Експериментально визначено раціональні параметри термочасової обробки розплавів ($T_{\text{ПЕР}} = 990...1000^{\circ}\text{C}$, $\tau = 5...10$ хв охолодження $5^{\circ}\text{C}/\text{c}$) при отриманні виливків з алюмінієвих сплавів методом ЛГМ.

Реалізація термочасової обробки розплаву дозволила при плавці використовувати підвищену кількість

вторинних матеріалів в шихті – до 85...90 %, при цьому виливки мають необхідну чистоту поверхні, розмірну точність, мінімальну пористість, герметичність, а також підвищений рівень механічних властивостей.

Список літератури

1. Кучер Д. С. Дослідження очищення алюмінієвих розплавів, отриманих із вторинної алюмінієвої сировини, фільтруванням. / Д.С. Кучер, Т.М. Нестеренко // Збірник наукових праць магістрантів факультету металургії ІІ ЗНУ. Вип. 1 (15). Запоріжжя: ІІ ЗНУ, 2019. С. 181-186.
2. Бредихін, В. М. Металургія кольорових металів [Текст] / Частина 7. Вторинна металургія кольорових металів. Підручник / Під ред. доктора технічних наук, професора Червоного І. Ф. // В. М. Бредихін, М. О. Маняк, В. О. Смирнов, В. І. Пожуєв, І. Ф. Червоний, В. П. Грицай. – Запоріжжя: В-во ЗДІА, 2009. -454 с.
3. Пат. України на корисну модель № 141729 МПК C21C1/00 Спосіб термочасової обробки сплавів для фасонних виливків / Александров В.Д., Алімов В. І., Корв'якова Н. П., Георгіаду М. В Фролова С. О., Зозуля А. П. - заявл. 16.09.2019, № u 201909842, опубл. 27.04.2020, Бюл. № 8
4. Косарев О. О. Термочасова обробка вторинних алюмінієвих сплавів в магнітодинамічній установці МДН-6А1 / О. О. Косарев // Спеціальна металургія. – 2010. – С. 84 – 89. http://www.fhotm.kpi.ua/sworks/05/kosarev_article_2010.pdf
5. Шпортко Г. Ю. Закономірності структуроутворення евтектичного силуміну з підвищеним рівнем механічних властивостей після керованого переходу з рідкого стану в твердий / Г.Ю. Шпортко ; Нац. металург. акад. України. — Д., 2007. — 20 с.
6. R.P. Barot Effect of multiple remelting on behaviour of AlSi5Cu3 / R.P. Barot, M.P. Sutaria // Aluminium alloy Materials Today: Proceedings Volume 62, Part 6, 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785322027705?via%3Dihub>
7. 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, January. - DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118838.
8. Чернега Д. Ф. Вплив водно на структуру та властивості алюмінієвих сплавів / Д.Ф. Чернега, В.М. Рибак // Київський політехнічний інститут. – Україна., - С. 117-125. http://www.fhotm.kpi.ua/sworks/01/rybak_article.pdf
9. Гринь О. М. Розвиток технологій алюмінію з вторинної сировини/ О. М. Гринь, В. М. Бредихін, І. Ф. Червоний, М. О. Маняк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», – 2013. - № 26 (999). – С.180- 185.
10. Lee, P.D. Modeling microporosity in aluminum-silicon alloys: A review / P.D. Lee, A. Chirazi, D. See // Journal of Light Metals. – 2001. - vol.1, release 1. – P. 15 - 30. - DOI 10.1016/S1471-5317(00)00003-1.
11. Кучер Д. С. Дослідження комплексного рафінування алюмінієвих розплавів, отриманих із вторинної алюмінієвої сировини / Кучер Д. С., Нестеренко Т. М. // Металургія як основа сучасної промисловості : матеріали ХХІV науково-техн. конф. студентів, магістрантів, аспірантів, молодих вчених та викладачів (м. Запоріжжя, 26–29 лист. 2019 р.). Т. І. Запоріжжя, 2019. С. 7–8.

Bibliography (transliterated):

1. Kucher D. S. Doslidzhennia ochyshchennia aliuminiievych rozplaviv, otrymanykh iz vtorynnoi aliuminiievoi syrovyni, filtruvanniam. / D.S. Kucher, T.M. Nesterenko // Zbirnyk naukovykh prats mahistrantiv fakultetu metalurhii II ZNU. Vyp. 1 (15). Zaporizhzhia: II ZNU, 2019. S. 181-186.
2. Bredykhin, V. M. Metalurhiia kolorovykh metaliv [Tekst] / Chastyna 7. Vtorynna metalurhiia kolorovykh metaliv. Pidruchnyk / Pid red. doktora tekhnichnykh nauk, profesora Chervonoho I. F. // V. M. Bredykhin, M. O. Maniak, V. O. Smyrnov, V. I. Pozhuiev, I. F. Chervonyi, V. P. Hrytsai. – Zaporizhzhia: V-vo ZDIA, 2009. -454 s.
3. Pat. Ukrainy na korysnu model № 141729 MPK C21C1/00 Sposib termochasovoi obrobky splaviv dlia fasonnykh vylyvkiv / Aleksandrov V.D., Alimov V. I., Korviakova N. P., Heorhiadu M. V Frolova S. O., Zozulia A. P. - zaiavl. 16.09.2019, № u 201909842, opubl. 27.04.2020, Biul. № 8
4. Kosariev O. O. Termochasova obrobka vtorynnykh aliuminiievych splaviv v mahnitodynamichnii ustanovtsi MDN-6A1 / O. O. Kosariev // Spetsialna metalurhiia. – 2010. – S. 84 – 89. http://www.fhotm.kpi.ua/sworks/05/kosarev_article_2010.pdf
5. Shportko H. Yu. Zakonomirnosti strukturoutvorennia evtektichnoho syluminu z pidvyshchenym rivnem mekhanichnykh vlastyvostei plisia kerovanoho perekhodu z riddkoho stanu v tverdyy / H.Yu. Shportko ; Nats. metalurh. akad. Ukrainy. — D., 2007. — 20 s.
6. R.P. Barot Effect of multiple remelting on behaviour of AlSi5Cu3 / R.P. Barot, M.P. Sutaria // Aluminium alloy Materials Today: Proceedings Volume 62, Part 6, 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785322027705?via%3Dihub>
7. 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, January. - DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118838.
8. Chernega D. F. Vplyv vodniu na strukturu ta vlastyvosti aliuminiievych splaviv / D.F. Chernega, V.M. Rybak // Kyivskyi politekhnichnyi instytut. – Ukraina., - S. 117-125. http://www.fhotm.kpi.ua/sworks/01/rybak_article.pdf
9. Hryn O. M. Rozvytok tekhnolohii aliuminiuu z vtorynnoi syrovyni/ O. M. Hryn, V. M. Bredykhin, I. F. Chervonyi, M. O. Maniak // Visnyk NTU «KhPI». Serii: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh. – Kh: NTU «KhPI», – 2013. - № 26 (999). – S.180- 185.
10. Lee, P.D. Modeling microporosity in aluminum-silicon alloys: A review / P.D. Lee, A. Chirazi, D. See // Journal of Light Metals. – 2001. - vol.1, release 1. – P. 15 - 30. - DOI 10.1016/S1471-5317(00)00003-1.
11. Kucher D. S. Doslidzhennia kompleksnoho rafinuvannia aliuminiievych rozplaviv, otrymanykh iz vtorynnoi aliuminiievoi syrovyni / Kucher D. S., Nesterenko T. M. // Metalurhiia yak osnova suchasnoi promyslovosti : materialy ХХІV naukovo-tekhn. konf. studentiv, mahistrantiv, aspirantiv, molodykh vchenykh ta vykladachiv (m. Zaporizhzhia, 26–29 lyst. 2019 r.). Т. І. Zaporizhzhia, 2019. S. 7–8.

Надійшла (received) 22.02.2026

Відомості про авторів / About the Authors

Скідін Ігор Едуардович (Skidin Ihor) - к.т.н., старший викладач кафедри металургії чорних металів і ливарного виробництва Криворізького національного університету, м. Кривий Ріг, Україна; тел.: +38 098 212 93 42, e-mail: skidin_ie@knu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3247-473.

Сітгарєєв Леван Наїльєві (Saitgareiev Levan) - к.т.н., доцент кафедри металургії чорних металів і ливарного виробництва Криворізького національного університету, м. Кривий Ріг, Україна; тел. +38 096 367 63 71, e-mail: saitgareev.levan@knu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6841-3202

Чубенко Вікторія Анатоліївна (Shubenko Victoriya) - к.т.н., доцент кафедри металургії чорних металів і ливарного виробництва Криворізького національного університету м. Кривий Ріг, Україна; тел.: +38 050 747 28 23, e-mail: chubenko_va@knu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3356-0285

Євтушенко Степан Дмитрович (Yevtushenko Stepan) - аспірант кафедри ливарного виробництва Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» м. Харків, Україна; тел.: +38 068 902 78 78, e-mail: stepanco.00@ukr.net ORCID: 0000-0003-0154-4563

Мішин Микита Миколайович (Mishin Mikita.) - студент Криворізького національного університету, Кривий Ріг, Україна; тел. +38 067 649 27 82, e-mail: Prkol.ua82@gmail.com, ORCID:0009-0006-0661-0725