УДК 669.715 DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2020.91.0.105

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВТОРИННИХ СИЛУМІНІВ В УМОВАХ СУЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА

Волчок І.П., Мітяєв О.А., Фролов Р.О., Круліковська О.О., Ванярха Т.В.
Національний університет «Запорізька політехніка»

Анотація. *Показано можливість отримання якісних вторинних силумінів із низькосортової шихти з високим вмістом заліза. Установлено, що комплексна технологія забезпечує отримання рівня механічних властивостей, що відповідають вимогам ДСТУ 2839-94 навіть за умови вмісті заліза в сплаві до 1,84 мас. %.*

Ключові слова: *вторинні силуміни, інтерметалідні фази, структура, спадковість, модифікувальна обробка.*

Вступ

Нині знайшли застосування два промислових способи отримання алюмінію та його сплавів: 1) шляхом електролізу глинозему Al_2O_3 в розплавленому кріоліті Na_3AlF_6 за умови температури 930…950 °С; 2) шляхом використання як шихти лому та відходів виробництва (залишки ливникових систем, брак, стружка алюмінію та його сплавів).

Аналіз публікацій

До переваг першого методу належить висока чистота алюмінію за шкідливими домішками, до недоліків – високовитратні технології отримання глинозему, кріоліту, вуглецевих матеріалів і проведення електролізу. Для отримання 1 т алюмінію витрачають близько 2 т глинозему, 25 кг кріоліту, 500…600 кг анодної (вуглецевої) маси. Витрати електроенергії тільки на електроліз 1 т алюмінію становлять 14000…16000 кВт·год. У собівартості отримання алюмінію електролізом витрати на вихідні матеріали становлять близько 50 %, а на електроенергію 30 % [1]. Також звертають на себе увагу серйозні екологічні проблеми, що мають місце у виробництві алюмінію методом електролізу.

Перевагами другого методу є низька вартість вихідної шихти, скорочення питомих енерговитрат і небезпечних викидів до атмосфери у 20 разів; недоліками – забруднення неметалевими матеріалами, мастилами та іншими домішками, що викликають підвищену шпаристість металу, а також формують грубу структуру з великими інтерметалідними включеннями пластинчастої форми та, як наслідок, низькі технологічні й механічні властивості сплавів.

З метою усунення або зниження рівня недоліків, що належать вторинним сплавам, окрім домішкового модифікування, яке широко застосовується, розроблено велику кількість методів оброблення рідкого металу: інертними газами, імпульсним електричним струмом, магнітними полями, ультразвуком, вібрацією, прискореним твердінням, дрібнокристалічними лігатурами або шихтою, методами змішування одно- та двофазних розплавів та ін. [2, 3]. У роботах Е.І. Маруковича та В.Ю. Стеценка [4, 5] установлено високі ефективність і технологічність спадкового модифікування силумінів дрібнокристалічною шихтою, завдяки генетичному зв'язку між структурою алюмінієвих сплавів у рідкому та твердому станах. Теоретичні дослідження та практика виробництва показали, що розплав алюмінію, що є проміжною ланкою в ланцюзі «шихта-розплав-виливок», несе інформацію про природу вихідних матеріалів і може слугувати об'єктом для покращення структури та властивостей литих виробів.

Мета і постановка завдання

Метою роботи є розроблення комплексної технології виробництва вторинних силумінів, що передбачає спадкове модифікування їхньою дрібнокристалічною шихтою та домішкове модифікування модифікувальним комплексом МК-1 і, як результат, досягнення механічних властивостей, що відповідають рівню властивостей первинних сплавів. У зв'язку із втратою Україною за роки незалежності власного виробництва первинного алюмінію, завдання підвищення якості вторинних алюмінієвих сплавів належить до стратегічно важливих на сьогодні.

Результати та їхнє обговорення

У роботі як шихти використовували технологічні відходи виробництва (елементи ливникових систем) сплавів АК7ч (АЛ9) та

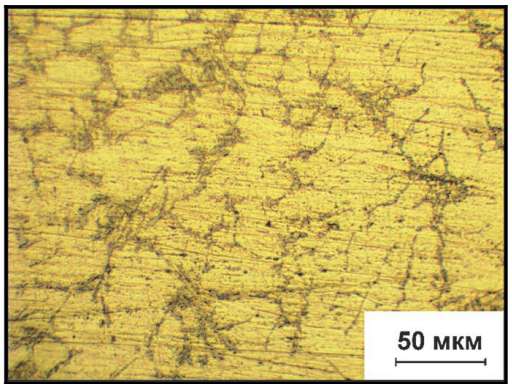
А356.2 (аналог АК7ч виробництва «Alcoa»). Наведені силуміни суттєво відрізнялися вмістом заліза (табл. 1).

Таблиця 1 – Хімічний склад шихти

Сплав	Вміст елементів, мас. %						
	Si	**Fe**	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
АК7ч	6,72	**0,60**	0,05	0,08	0,32	0,02	0,01
А356.2	7,07	**0,11**	0,02	0,02	0,23	0,03	0,07

Дрібнокристалічну шихту (ДКШ) готували з цих вторинних силумінів шляхом розливання рідкого металу через перфоровану ємність у воду кімнатної температури. Таким чином отримували ДКШ у вигляді гранул близьких за розмірами фракцій (рис. 1, а) з інвертованою мікроструктурою (рис. 1, б).

а



б

Рис. 1. Зовнішній вигляд і мікроструктура гранул дрібнокристалічної шихти: а – гранули ДКШ; б – мікроструктура гранул ДКШ

Дослідження проводили із застосуванням математичного планування експерименту. Для цього було задіяно ротатабельний план другого порядку 2^3, відповідно до якого складено матрицю планування експерименту (табл. 2).

Таблиця 2 – Кодування факторів під час дослідження зони оптимуму за допомогою ротатабельного плану другого порядку, К=3

Інтервал варіювання і рівень факторів		Фактори, що вивчались		
		X_1 (ДКШ, %)	X_2 (Fe, %)	X_3 (МК1, %)
Нульовий рівень X_0=0		42,05	1,0	0,1
Інтервал варіювання	1,0	25	0,5	0,05
	1,682	42,05	0,84	0,084
Нижній рівень	X=-1,0	17,05	0,5	0,05
Верхній рівень	X=+1,0	67,05	1,5	0,15
Зіркові точки	X=-1,682	0	0,16	0,016
	X=+1,682	84,1	1,84	0,184

Примітка: X_1 – кількість ДКШ у загальній масі шихти, мас. %;

X_2 – вміст заліза у сплаві, мас. %;

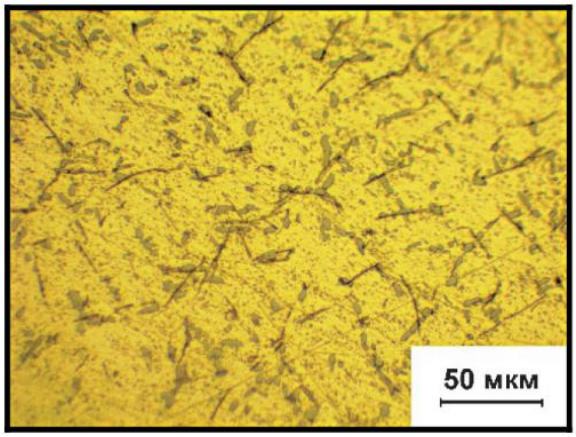
X_3 – кількість модифікувального комплексу МК-1 для оброблення розплаву, мас. %.

Відповідно до матриці планування, експериментальні 20 сплавів отримували в печі опору в тиглі ємністю 3 кг.

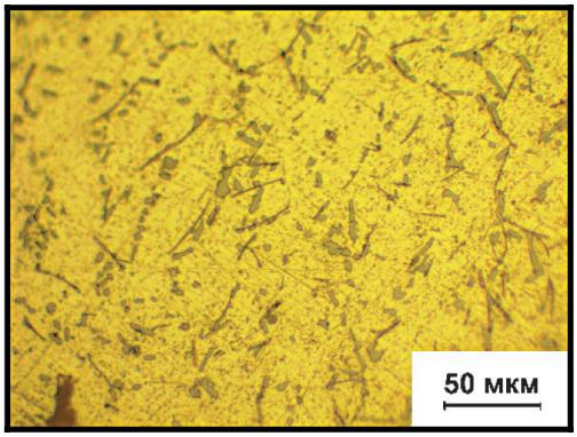
Необхідний вміст заліза в кожному сплаві було забезпечено співвідношенням складових шихти (див. табл. 1) і присадками до розплаву залізного порошку ПЖР2 за умови температури 720 °С. Перед заливанням у сталевий кокіль розплав обробляли в тиглі модифікувальним комплексом МК-1 [6] за допомогою приспособи «дзвоник».

Металографічні дослідження проводили на оптичному мікроскопі «SIGETA ММ-700» після оброблення поверхонь шліфів реактивом Келлера (0,5%HF+0,5%HNO_3+1,5%HCl) упродовж 10 с. Механічні властивості дослідних сплавів визначали після термооброблення за режимом Т6 згідно з ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93).

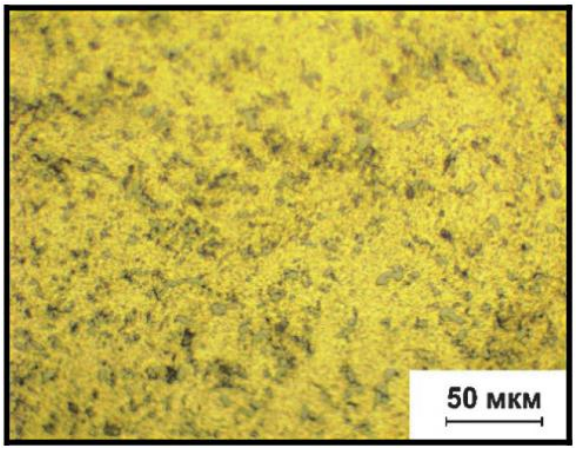
Усі дослідні сплави, незалежно від технологічного варіанта виплавлення, мали структуру, що складалася з алюмінієвої матриці (α – твердий розчин Si та інших домішок у Al), евтектичного Si та інтерметалідних фаз Al_5FeSi, Al_3Fe, Al_2Fe (рис. 2).



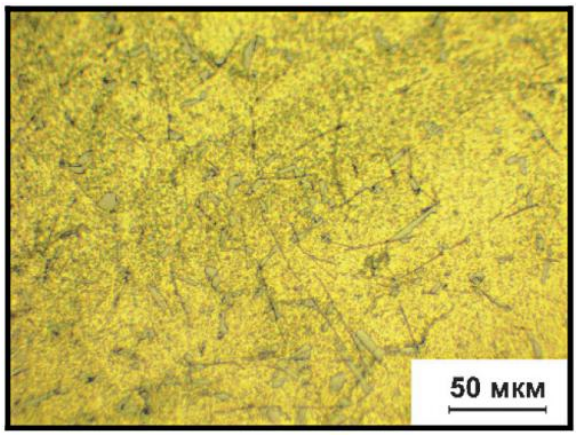
а



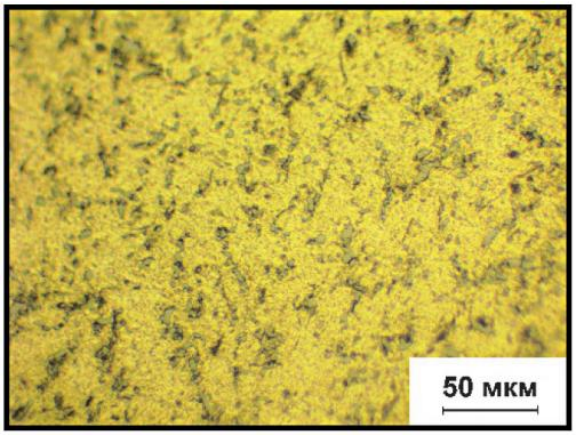
б



в



г



д

Рис. 2. Мікроструктура дослідних сплавів з вмістом заліза 1,0 мас. %: а – 0 % ДКШ, 0,1 % МК-1; б – 42,05 % ДКШ, 0,1 % МК-1; в – 84,1 % ДКШ, 0,1 % МК-1; г – 42,05 % ДКШ, 0,016 % МК-1; д – 42,05 % ДКШ, 0,184 % МК-1

Дослідження продемонстрували, що залежно від вмісту ДКШ у загальному об'ємі шихти, заліза в хімічному складі сплаву та кількості застосовуваного для оброблення розплаву модифікувального комплексу МК-1, частинки кремнію та залізовмісних інтерметалідних фаз змінювали свій розмір, форму та характер розповсюдження, що було основним фактором, який впливав на структуру та механічні властивості сплавів [2, 7].

Підвищення вмісту заліза в сплаві з 0,16 до 1,84 мас. % спричинило збільшення кількості залізовмісних інтерметалідних фаз несприятливої морфології, а оброблення розплавів модифікувальним комплексом МК-1 – до отримання інтерметалідів і кремнію компактної форми.

Збільшення вмісту ДКШ у загальному складі шихти сприяло диспергуванню основних структурних складових і подрібненню зерен α – твердого розчину (див. рис. 2).

Статистичне оброблення результатів дозволило отримати залежності зміни границі міцності, відносного видовження і твердості від дослідних факторів у вигляді рівнянь регресії другого порядку:

$$\sigma_в = 215{,}85 + 1{,}6ДКШ + 83{,}97Fe + \\ +579{,}58(МК-1) + 0{,}35ДКШFe - \\ -0{,}63ДКШ\,(МК-1) + 152{,}5\,Fe(МК-1) - \\ -0{,}026ДКШ^2 - 63{,}34Fe^2 - 3568{,}84(МК-1)^2 \quad , \quad (1)$$

$$\delta = 4{,}65 + 0{,}09ДКШ + 0{,}52Fe + +26{,}67(МК-1) + 0{,}36ДКШ (МК-1) + +2Fe(МК-1) - 0{,}001ДКШ^2 - 2{,}27Fe^2 - -255{,}4(МК-1)^2, \quad (2)$$

$$HRB = 28{,}65 + 0{,}4ДКШ + 10{,}15\,Fe + +191{,}27(МК-1) + 0{,}09ДКШFe - -0{,}92ДКШ(МК-1) - 4{,}15Fe(МК-1) - -0{,}007ДКШ^2 - 4{,}27Fe^2 - 592{,}68(МК-1). \quad (3)$$

Графічна інтерпретація рівнянь (1)–(3) ілюструє вплив кількості ДКШ у процесі постійної присадки модифікувального комплексу МК-1, що дорівнює 0,1 мас. %, на механічні властивості вторинного сплаву АК7ч з трьома концентраціями заліза (рис. 3, а). Вплив величини присадки модифікувального комплексу МК-1 на механічні властивості вторинного сплаву АК7ч за умови постійного вмісту ДКШ (42,05 мас. %) у загальній кількості шихти та тих самих концентраціях заліза зображено на рис. 3, б.

Аналіз отриманих моделей свідчить про наявність екстремальних залежностей $\sigma_в$, δ і HRB від вмісту ДКШ у загальному об'ємі шихти, а також величини присадки модифікувального комплексу МК-1.

Найбільш високі значення механічних властивостей вторинного силуміну АК7ч отримано за умови вмісту ДКШ на рівні 35…45 мас. % від загального об'єму шихти, а також присадки до розплаву модифікувального комплексу МК-1 у кількості 0,09…0,11 мас. %. Підвищення в сплаві вмісту заліза зсуває величини кількості ДКШ і МК-1, що забезпечують оптимальні значення комплексу механічних властивостей у бік їхнього збільшення.

Варто наголосити на екстремальному характері залежності границі міцності від вмісту у складі сплаву заліза. Це можна пояснити тим, що до певної кількості залізовмісні інтерметалідні фази гальмують рух дислокацій та сприяють підвищенню міцності у більшій кількості унаслідок їхньої високої крихкості та здатності до розшаровування, вони знижують пластичність і полегшують процеси руйнування [2, 7].

Результати виконаних досліджень показали дієву можливість підвищення механічних властивостей вторинного сплаву АК7ч. Установлено, що оптимальні величини ДКШ і МК-1 забезпечили отримання механічних властивостей вторинного сплаву АК7ч вище за вимог ДСТУ 2839-94 (див. рис. 3).

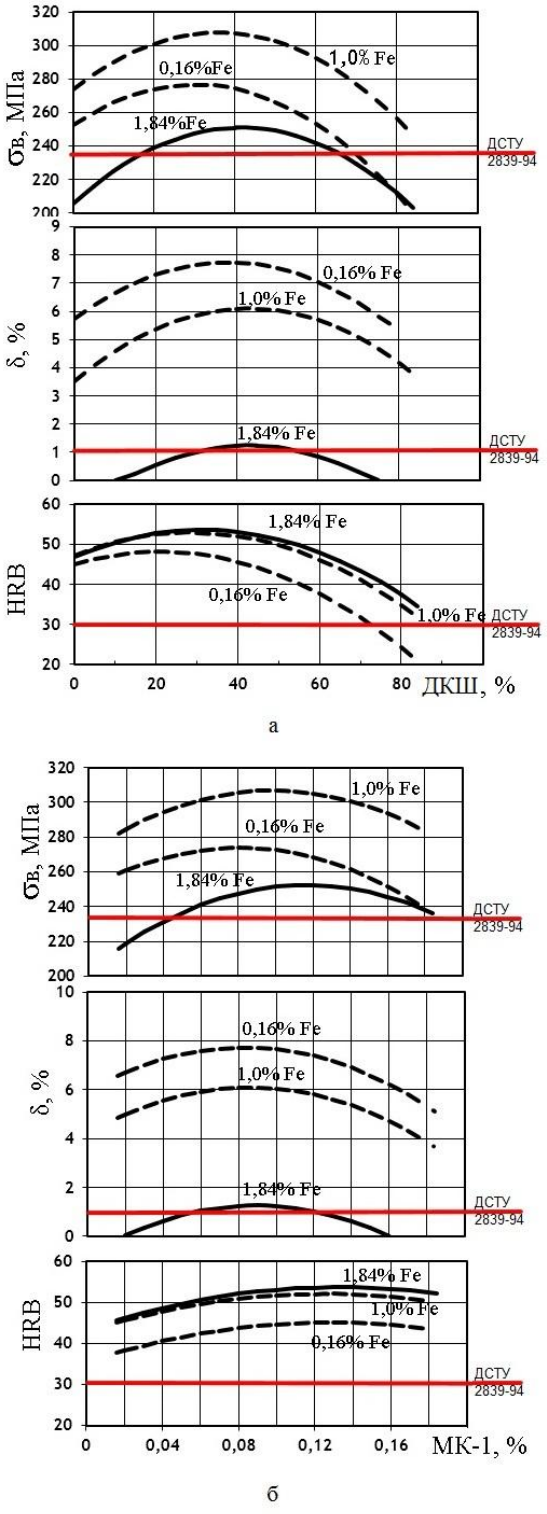


Рис. 3. Залежність механічних властивостей вторинного сплаву АК7ч від технології виготовлення: а – вплив кількості ДКШ при 0,1 мас. % МК-1; б – вплив кількості МК-1 за умови 42,05 мас. % ДКШ

Висновки

1. Розроблено комплексну технологію, що передбачає використання дрібнокристалічної шихти та модифікувального оброблення, для виробництва якісних силумінів із

низькосортової шихти з високим вмістом заліза.

2. Технологія пройшла перевірку в промислових умовах АТ «Мотор Січ» і рекомендована до впровадження [8].

Література

1. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: підручник / Д.Ф. Чернега, В.С. Богушевский, Ю.Я. Готвянський та ін.; за ред. Д.Ф. Чернеги, Ю.Я. Готвянського. Київ: Вища школа, 2006. 503с.
2. Мітяєв О.А. Науково-технологічні основи формування структури, фізико-механічних і службових властивостей вторинних силумінів: автореф. дис. ... д-р техн. наук. Запоріжжя, 2008. 34 с.
3. Пригунов С.В. Структуроутворення та механічні властивості доевтектичних залізовмісних силумінів, оброблених у рідкому стані однополярним імпульсним електричним струмом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Дніпропетровськ, 2014. 21 с.
4. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю. Модифицирование сплавов. Минск: Беларуская навука, 2009. 192 с.
5. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю. Получение литейных сплавов с инвертированной структурой // Литье и металлургия. 2001. № 4. С. 36–39.
6. Пат. 46094 Україна, МПК (2009) C22C1/00. Модифікувальний комплекс для алюмінієвих сплавів / К.М. Лоза, О.А. Мітяєв, І.П. Волчок (Україна); заявник та патентовласник Запорізький національний технічний університет. № u200905914; заявл. 09.06.2009; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23. 4 с.
7. Лютова О.В. Підвищення технологічних та механічних властивостей доевтектичних вторинних силумінів: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Запоріжжя, 2012. 17 с.
8. Наследственное модифицирование вторичных алюминиевых сплавов / Р.А. Фролов, А.А. Митяев, И.П. Волчок, А.С. Петрашев // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. Днипро, 2017. Вып. 95. С. 142–148.

References

1. Cherneha D.F. *Osnovy metalurhiinoho vyrobnytstva metaliv i splaviv. Pidruchnyk* / [Fundamentals of metallurgical production metals and alloys. Textbook] D.F. Cherneha, V.S. Bohushevskyi, Yu.Ia. Hotvianskyi et al. – Kyiv: Vyshcha shkola, 2006. 503 p. [in Ukrainian].
2. Mityaev A.A. *Naukovo-tekhnolohichni osnovy formuvannia struktury, fizyko-mekhanichnykh i sluzhbovykh vlaslyvostei vloryn - nykh syluminiv: avtoref. dis. na zdobuttya stupenya doktora tehn. nauk: spets. 05.02.01* [Scientific and technological bases of formation of structure, physical, mechanical and service properties of secondary silumins: abstract for the degree of doctor of engineering. Sciences specials. 05.02.01]. Zaporizhia, 2008, 34 p. Available at: http:// www.irbis-nbuv.gov.ua. [in Ukrainian].
3. Prigunov S.V. *Strukturoutvorennya ta mehanichni vlastivosti doevtektychnyh zalizovmisnyh syluminiv. obroblenyh u ridkomu stani odnopolyarnum impulsnym elektrychnym strumom: avtoref. dis. na zdobuttya stupenya kand. tehn. nauk: spets. 05.16.01* [Structure formation and mechanical properties of hypoeutectic iron-bearing silumines, treated in a liquid state by unipolar pulsed electric current] Dnipropetrovsk, 2014, 21p. Available at: http:// www.irbis-nbuv.gov.ua. [in Ukrainian].
4. Marukovich E.I. *Modifitsirovanie splavov* [Modifying alloys]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2009, 192 p. [in Russian].
5. Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu. Poluchenie liteynyh splavov s invertirovannoy strukturoi [Production of cast alloys with inverted structure]. *Lit'e i metallurgija [Foundry production and metallurgy]*, 2001, no. 4. pp. 36-39.
6. Loza K.M. *Modyfikuvalnyi kompleks dlia aliuminiievykh splaviv* [Modifying complex for aluminium alloys] / O.A. Mityayev, I.P. Volchok. Patent UA, no. u200905914, 2009. [in Russian].
7. Lyutova O.V. *Pidvyschennia tekhnolohichnykh ta mekhanichnykh vlastyvostei doevtektychnykh vtorynnykh syluminiv: avtoref. dis. na zdobuttya stupenya kand. tehn. nauk: spets. 05.02.01* [Increasing of technological and mechanical properties of hypoeutectic secondary silumins: abstract for the degree of candidate of engineering. Sciences specials. 05.02.01]. Zaporizhia, 2012, 17p. [in Ukrainian].
8. Frolov R.A. Nasledstvennoe modificirovanie vtorichnyh aljuminievyh splavov / [Hereditary modification of secondary aluminum alloys] / A.A. Mityaev, I.P. Volchok, A.S. Petrashev. *Stroitelslvo. Malerialovedenie. Mashinostroenie. Seriia Starodubovskie chteniia [Building. Material science. Mechanical engineering. Series: Starodubov readings]*, 2017, no. 95. pp. 142-148. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmsc_2017_95_26. [in Russian].

Волчок Іван Петрович[1], д.т.н., проф. каф. «Композиційні матеріали, хімія та технології», тел. +380676125532, e-mail: volchok@gmail.com.

Мітяєв Олександр Анатолійович[1], д.т.н., проф., зав. каф. «Композиційні матеріали, хімія та технології», тел. +380963034187, e-mail: tmzntu@gmail.com.

Фролов Роман Олександрович[1], аспірант каф. «Композиційні матеріали, хімія та технології», тел. +380938104885, e-mail: frolovra@i.com.

Круліковська Ольга Олександрівна[1], аспірант каф. «Композиційні матеріали, хімія та технології», тел. +380990463053, e-mail: tmzntu@gmail.com.

Ванярха Тетяна Віталіївна[1], бакалавр каф. «Композиційні матеріали, хімія та технології», e-mail: тел. +380986060142, tmzntu@gmail.com.
[1]Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, м. Запоріжжя, Україна.

Повышение качества вторичных силуминов в условиях современного производства

Аннотация. *Показана возможность получения качественных вторичных силуминов из низкосортной шихты с высоким содержанием железа. Установлено, что комплексная технология обеспечивает получение уровня механических свойств, которые соответствуют требованиям ДСТУ 2839-94 даже при содержании железа в сплаве до 1,84 масс. %.*

Ключевые слова: вторичные силумины, интерметаллидные фазы, структура, наследственность, модифицирующая обработка.

Волчок Иван Петрович[1], д.т.н., проф. каф. «Композиционные материалы, химия и технологии», тел. +38 0676125532, volchok@gmail.com.
Митяев Александр Анатольевич[1], д.т.н., проф., зав. каф. «Композиционные материалы, химия и технологии», тел. +380963034187,
e-mail: tmzntu@gmail.com,
Фролов Роман Александрович[1], аспирант каф. «Композиционные материалы, химия и технологии», тел. +380938104885e-mail: frolovra@i.com.
Круликовская Ольга Александровна[1] аспирант каф. «Композиционные материалы, химия и технологии», тел. +380990463053,
e-mail: tmzntu@gmail.com.
Ванярха Татьяна Витальевна[1], бакалавр каф. «Композиционные материалы, химия и технологии», тел. +380986060142,
e-mail: tmzntu@gmail.com.
[1]Национальный университет «Запорожская политехника», ул. Жуковского, 64, 69063, г. Запорожье, Украина.

Increasing secondary silumins quality in the conditions of prezent day production

Abstract. Problem. *Due to the lack of domestic production of primary aluminum in Ukraine, an actual problem is the development of technological processes for producing high-quality aluminum alloys using secondary raw materials. It is known that secondary aluminum raw materials are characterized by a high content of undesirable impurities, which makes it difficult to obtain alloys with the required level of technological and mechanical properties.* ***Goal.*** *The aim is development of a technology for the production of aluminum alloys from secondary raw materials that meet the requirements of modern standards and technical conditions.* ***Methodology.*** *Development of a complex technology, including the hereditary modification of liquid metal by a fine crystalline charge and impurity modification by modifier MK-1.* ***Results.*** *Complex modification provided a reduction in the size and shape parameter of intermetallic phases and silicon particles, which positively affected the mechanical properties of the alloys.* ***Originality.*** *It was established that complex modification made it possible to neutralize the negative effect of iron, which is the most harmful impurity in secondary alloys. It was established, that silumin AK7 with Fe content up to 1.84 % meets the requirements of the standard for mechanical properties.* ***Practical value.*** *The results of industrial tests showed that the developed technology of complex modification expands the possibilities of producing silumins of the required quality using cheap secondary raw materials.*

Key words: *secondary silumins, intermetallic, phases, structure, hereolity, modification treatment*

Volchok Ivan[1], Doct. of Science, Professor of the Composite Materials, Chemistry and Technology Department, e-mail: volchok@gmail.com,
тел. +380676125532.
Mityayev Olexandr[1], Doct. of Science, Professor, Head of the Composite Materials, Chemistry and Technology Department, тел. +380963034187,
e-mail: tmzntu@gmail.com.
Frolov Roman[1], Postgraduate Student of the Composite Materials, Chemistry and Technology Department, тел. +380938104885,
e-mail: frolovra@i.com.
Krulikovska Olha[1], Postgraduate Student of the Composite Materials, Chemistry and Technology Department, тел. +380986060142,
тел. +380990463053, e-mail: tmzntu@gmail.com.
Vaniarkha Tetiana[1], Bachelor of the Composite Materials, Chemistry and Technology Department, тел. +380986060142, e-mail: tmzntu@gmail.com.
[1]National University «Zaporizhzhia Polytechnic», 64, Zhukovskoho str., 69063, Zaporizhzhia, Ukraine.