

УДК 669.715:621.785.9

І. П. ВОЛЧОК^{1*}, О. Л. СКУЙБИДА², О. В. ЛЮТОВА³, Н. В. ШИРОКОБОКОВА⁴^{1*}Каф. «Технологія металів», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (061) 764 13 51, ел. пошта tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0003-1580-0556²Каф. «Охорона праці і навколишнього середовища», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (050) 972 40 73, ел. пошта eskuybeda@gmail.com, ORCID 0000-0003-1488-8568³Каф. «Нарисна геометрія, інженерна та комп'ютерна графіка», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (097) 141 85 66, ел. пошта lyutova2014@gmail.com, ORCID 0000-0002-8818-2608⁴Каф. «Технологія металів», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (093) 817 13 44, ел. пошта tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0002-7009-6218**ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВТОРИННИХ СИЛУМІНІВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ РАФІНУВАЛЬНО-МОДИФІКУВАЛЬНОЇ, ТЕРМІЧНОЇ ТА ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБОК**

Мета. Вторинним силумінам притаманна, як правило, нижча за їх первинні аналоги якість. При виготовленні сплавів не враховується наявність великої кількості інтерметалідів, передусім на основі заліза, в їх структурі. Для досягнення оптимального рівня властивостей необхідно шукати шляхи адаптації рафінувально-модифікувальної, термічної та лазерної обробок до особливостей структури вторинних Al-Si сплавів.

Методика. Дослідження здійснювали з використанням стандартних методик металографічного аналізу, визначення ливарних, механічних та експлуатаційних властивостей сплавів за рототабельними планами багатofакторних експериментів. **Результати.** Встановлено, що рафінувально-модифікувальна обробка є обов'язковою операцією при виготовленні вторинних силумінів, оскільки дозволяє ефективно впливати на виділення залізовмісних фаз, змінюючи їх морфологію, розмір та розподіл, а також підвищувати ефективність подальшої обробки в твердому стані. Виявлено, що стандартні режими термічної обробки не є оптимальними для вторинних силумінів. Лазерна обробка показала високу ефективність в підвищенні міцності, зносостійкості, корозійної та кавітаційної стійкості вторинних Al-Si сплавів, а підвищений вміст заліза сприяв додатковому твердорозчинному зміцненню. **Наукова новизна.** Встановлено, що після рафінувально-модифікувальної обробки фаза Al_5SiFe , яка кристалізується у вигляді довгих витягнутих пластин, трансформується в фазу $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$ у скелетоподібній або багатогранній формі. Отримано залежність між вмістом заліза у вторинних силумінах з часом витримки при термічній обробці, який забезпечує оптимум механічних властивостей. Доведено, що наявність залізовмісних інтерметалідів Al_5SiFe призводить до зменшення глибини зміцненого шару при лазерній обробці. Встановлено, що зі збільшенням концентрації заліза швидкість корозії вторинних силумінів в середовищах 3 % NaCl + 0,1 % H_2O_2 та 10 % HCl підвищується. **Практична значимість.** Запропоновані технічні рішення сприяють підвищенню якості вторинних силумінів до рівня, який дозволяє використовувати їх як сировину для виготовлення сплавів на основі алюмінію.

Ключові слова: силуміни; модифікування; термічна обробка; імпульсна лазерна обробка; ливарні; механічні та експлуатаційні властивості

Вступ

Нині алюмінієві сплави, виготовлені із вторинної сировини, все ширше використовуються в автомобілебудуванні, авіаційній промисловості, цивільному та промисловому будівництві тощо. Так, за даними [3], обсяг випуску вторинного алюмінію в країнах ЄС сягає 5,2 млн т/р, що знаходиться на приблизно однаковому рівні з випуском первинного алюмінію (5,1 млн т/р). Використання вторинної сировини дозволяє по-

збутися проблеми накопичення відходів, ослабити техногенне навантаження на довкілля та знизити собівартість випуску продукції.

Поряд із безсумнівними перевагами використання вторинних ресурсів існує і суттєвий недолік – низька якість сплавів, пов'язана із значною кількістю інтерметалідних фаз, розчинених газів та неметалевих включень в структурі, а також підвищеною пористістю. При цьому основний вклад в погіршення фізико-механічних властивостей вторинних Al-Si сплавів на-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

лежить залізовмісним фазам Al_5SiFe , Al_4Si_2Fe , Al_8Fe_2Si та ін., що мають грубокристалічну будову, несприятливу пластинчасту форму і полегшують процес руйнування матеріалу, відіграючи роль концентраторів напружень [14, 15].

У ході аналізу літературних джерел було з'ясовано, що найбільш дієвим способом впливу на виділення залізовмісних фаз в структурі вторинних силумінів є модифікування. Термічна обробка є однією з основних технологічних операцій, застосування якої забезпечує отримання певних механічних та експлуатаційних властивостей. Виходячи з того, що вміст інтерметалідних фаз під час використання вторинної сировини значно зростає, у нас виникло припущення, що стандартні режими термічної обробки для вторинних Al-Si сплавів не можна вважати оптимальними, проте цьому питанню в літературних джерелах уваги не приділяється. Незважаючи на суттєве підвищення властивостей, яке вдається досягти модифікувальною та термічною обробками, недоліком силумінів залишаються низькі втомна міцність, кавітаційна та корозійна стійкість. Достатньо ефективним і технологічним способом вирішення цієї проблеми є поверхнева лазерна обробка. Відомі сьогодні роботи з лазерної обробки стосуються первинних силумінів. Нами зроблено припущення, що застосування лазерної обробки може виявити кращі результати для вторинних сплавів за рахунок твердорозчинного зміцнення домішковими елементами, передусім залізом.

Мета

Мета роботи – адаптація рафінувально-модифікувальної, термічної та лазерної обробок до особливостей структури та властивостей Al-Si сплавів, виготовлених із вторинної сировини.

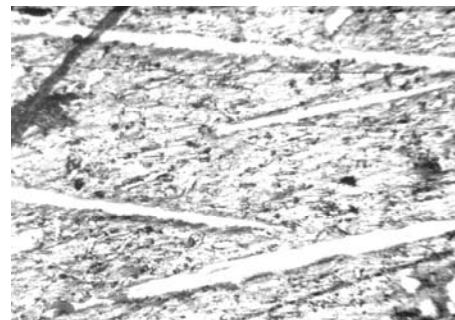
Методика

Дослідження здійснювали з використанням методів математичного планування експерименту, регресійного та кореляційного аналізів, а також методів статистичної обробки експериментальних результатів. Під час виконання досліджень здійснювали хімічний аналіз складу сплавів, металографічні дослідження, випробування ливарних, механічних та експлуатаційних властивостей за стандартними методиками.

Результати

Дослідження на кафедрі технології металів ЗНТУ (м. Запоріжжя) сприяли розробці низки рафінувально-модифікувальних комплексів вторинних силумінів [6–10], до складу яких в різних комбінаціях та концентраціях увійшли такі компоненти, як SiC, Ti, C, S, Na_2CO_3 , $SrCO_3$, KBF_4 , K_2TiF_6 , $MnCl_2$, KCl, NaCl, AlF_3 . Склад сумішей підбирався з метою збільшення дисперсності та компактності структурних складових, зміни складу та морфології інтерметалідів на основі заліза, а також зменшення вмісту водню. Провідна роль в нейтралізації шкідливого впливу заліза при цьому належить присадкам сірки. Так, за даними [5, 13], присутній в структурі немодифікованих силумінів інтерметалід Al_5SiFe має моноклінну ґратку з параметрами $a = b = 0,612$ нм та $c = 4,15$ нм і ковалентний тип міжатомних зв'язків, що зумовлює тонкопластинчасту форму виділень (рис. 1, а). Легування фази сіркою призводить до металізації міжатомних зв'язків, втрати їх направленості та зміни форми залізовмісних інтерметалідів (рис. 1, б).

а – а



б – б



Рис. 1. Зміна морфології залізовмісних інтерметалідів в структурі сплаву АК9М2 під впливом модифікування ($\times 500$):
а – фаза Al_5SiFe ; б – фаза $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$

Fig. 1. Change of iron-containing intermetallides' morphology in the structure of alloy АК9М2 under the influence of modification ($\times 500$):
а – phase Al_5SiFe ; б – phase $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Зокрема, збільшення твердості, міцності та пластичності сплавів, виготовлених з лому та відходів виробництва, пов'язані зі зміною морфологічних параметрів структури під впливом модифікування [1, 7]. Замість фази Al_3SiFe несприятливої морфології в структурі вторинних силумінів ми спостерігали утворення сполуки $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$, що приймала скелетоподібну або многогранну форму залежно від концентрації заліза та режиму термічної обробки. Значення параметру форми залізовмісних інтерметалідів зменшувалось при цьому в середньому в 2,5...3,5 рази, що позначалось на ослабленні дії концентраторів напружень, якими є вершини голчастих вкраплень. Після обробки модифікатором сплавів АК5М2 та АК6М2 відбулось підвищення твердості НВ на 23...31 %, границі міцності під час випробування на розтяг на 11...12 % та відносного видовження на 26...67 %.

Дослідження на вторинному силуміні АК9М2 виявили, що зі збільшенням стружки в шихті з 1 % до 19 %, а також кількості заліза в сплаві з 0,66 мас. % до 2,34 мас. % відбувалось зниження рідинноплинності на 30...35 %, лінійної усадки та тріщиностійкості на 18...25 %, спостерігався ріст пористості з 0,5 до 2...2,5 балу. Присадки модифікатора у кількості 0,15 % від маси сплаву призводили до підвищення рідинноплинності в середньому на 10...15 %, лінійної усадки на 30...35 % та зменшення балу газової пористості з 2,5 до 0,5. До того ж, під час застосування рафінувально-модифікувальної обробки метал зварних з'єднань успадковував властивості основного литого металу та за твердістю, міцністю і пластичністю навіть перевершував його [4]. Однорідність та диференціація структури зварного шва зберігалася після термічної обробки, причому макро- та мікроструктура зварного шва були дисперсними за основний метал (рис. 2).

На наступному етапі досліджували взаємозв'язок вмісту заліза у складі вторинних силумінів з часовими параметрами гартування та старіння. В результаті експерименту з'ясовано, що інтерметаліди на основі заліза після попередньої рафінувально-модифікувальної обробки здатні змінювати свої форму, розмір та розподіл під час термічного впливу. Одні режими термічної обробки виявилися сприятливішими за інші залежно від концентрації заліза, про що

свідчили структурні зміни та результати випробування механічних властивостей [2, 11].

Встановлено, що при вмісті заліза на рівні 0,5 мас. % доцільно використовувати час витримки при гартуванні до 7 год.

При концентрації $Fe = 1,2$ мас. % виникає потреба в збільшенні часу витримки при гартуванні до 8 год. Що стосується старіння, то для силумінів із вмістом близько 0,5 мас. % Fe використання нижньої межі стандартного часу витримки (5...10 год відповідно до ДСТУ 2839-94) не дає оптимального результату. При такій концентрації заліза необхідно використовувати час витримки при старінні на рівні 7 год. На кожні 0,1 мас. % Fe при його вмісті у вторинних силумінах більше за 0,5 мас. % потрібно додатково передбачити 0,5 год витримки. Необхідність збільшення часу витримки при збільшенні концентрації заліза в сплавах ми пов'язуємо зі зростанням кількості інтерметалідних фаз, які гальмують дифузійні процеси при гартуванні та старінні.

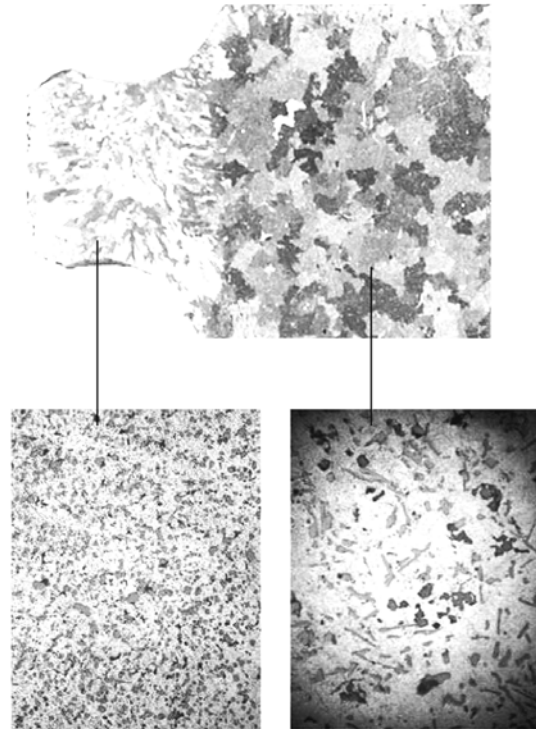


Рис. 2. Макро- та мікроструктура ($\times 100$) зварного шва та основного металу сплаву АК9М2 після аргоно-дугового плавлення

Fig. 2. Macro- and microstructure ($\times 100$) of the welding joint and basic metal of the alloy АК9М2 after argon-arc melting

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Під час збільшення часу витримки при гартуванні τ_r попередньо рафінованого та модифікованого вторинного силуміну АК8МЗ із вмістом Fe = 1,2 мас % з 6 до 8 год та часу витримки при старінні $\tau_{ст}$ з 7 до 11 год відбулись сприятливі зміни в структурі: зменшились розміри та збільшилась диференціація структурних складових, що показано на рис. 3. При цьому спостерігали підвищення значень границі міцності та плинності в середньому на 7...8 %, границі витривалості – на 12 %, малоциклової витривалості ($\epsilon = 0,3$ %) – на 30 %, твердості НВ на – 9 % та відносного видовження на 10 %.

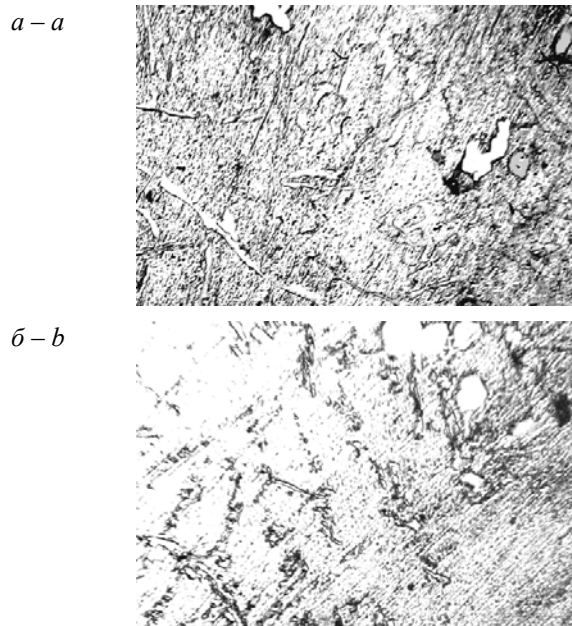


Рис. 3. Вплив часових параметрів термічної обробки на структуру вторинного силуміну АК8МЗ ($\times 200$):
a – $\tau_r = 6$ год, $\tau_{ст} = 7$ год; *b* – $\tau_r = 8$ год, $\tau_{ст} = 11$ год

Fig. 3. Influence of heat treatment time parameters on the structure of secondary silumin AK8M3 ($\times 200$):
a – $\tau_r = 6$ hrs, $\tau_{ag} = 7$ hrs; *b* – $\tau_r = 8$ hrs, $\tau_{ag} = 11$ hrs

В результаті лазерної обробки відбувалося суттєве подрібнення структури, збільшення дефектів кристалічної будови та утворення метастабільних фаз. Поверхнева лазерна обробка вторинного сплаву АК8МЗ привела до підвищення поверхневої мікротвердості в середньому в 1,7 разу та міцності в 3 рази порівняно з алюмінієвим твердим розчином (табл. 1). Проте наявність залізозмісних інтерметалідів типу Al_5SiFe внаслідок їх великих розмірів та несприятливої морфології збільшувала тепловий опір між зоною оплавлення і матрицею та,

відповідно, викликала зменшення глибини зміцненого шару. Таким чином, ефективній лазерній обробці сприяло попереднє модифікування сплавів.

Таблиця 1

Мікротвердість та границі міцності сплаву АК8МЗ після однократної лазерної обробки

Table 1

Microhardness and strength limits of AK8M3 alloy after single laser treatment

Вміст Fe, мас. %	Показник	Зміцнений шар (100 мкм від поверхні)	Матриця (Al)
0,40	Hц, МПа	1 605	975
	σ_B , МПа	515	172
0,92	Hц, МПа	1 625	994
	σ_B , МПа	523	180
1,45	Hц, МПа	1 620	1 000
	σ_B , МПа	524	174

Зі зростанням концентрації заліза від 0,4 мас. % до 1,45 мас. % спостерігали збільшення границі витривалості силуміну АК8МЗ в середньому на 19 %, зменшення втрати маси зразків в умовах зношування об нежорстко закріпленій абразив на 25 %, при сухому терті «метал по металу» – на 41 % та при кавітаційному зношуванні – на 60 %.

За даними корозійних випробувань у водному розчині 3 % NaCl + 0,1 % H_2O ($t = 28$ °C, $\tau = 720$ год) збільшення концентрації заліза з 0,4 мас. % до 1,45 мас. % призвело до зростання кількості пітингів з 35 шт/см² до 103 шт/см². Структурні складові сплаву із вмістом заліза на нижньому рівні були дисперсними та невеликими за розмірами, тому і площа розтравлювання навколо них, і глибина пітингової корозії були незначними. Під час збільшення концентрації заліза, а, отже, і кількості та розмірів інтерметалідів на його основі, зростали протяжність меж «матриця-вкраплення», площа руйнування матриці та швидкість проникнення пітингу вглиб матеріалу. Лазерна обробка дозволила підвищити опір вторинного силуміну АК8МЗ пітингоутворенню в 5...8 разів. Корозійна стійкість сплаву в 10 %-му розчині HCl після обробки лазером зросла в середньому на два порядки, а бал корозійної стійкості зменшився з 10 до 5...7 відповідно до ГОСТ 13819-68.

Наукова новизна та практична значимість

Встановлено, що модифікування вторинних силумінів [6–10] дозволяє трансформувати фазу Al_5SiFe , яка кристалізується у вигляді довгих витягнутих пластин, у фазу $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$ із більш сприятливою (скелетоподібною або многогранною) формою. Застосування розроблених і запатентованих рафінувально-модифікувальних комплексів дозволило зменшити бал газової пористості, суттєво збільшити рідинноплинність, лінійну усадку, твердість, міцність та пластичність силумінів, виготовлених із вторинної сировини.

Виявлено залежність між концентрацією заліза в Al-Si сплавах з часом витримки при термічній обробці, який забезпечує оптимум механічних властивостей. Встановлено, що для силумінів із вмістом більше за 0,5 мас. % Fe необхідно збільшувати передбачений стандартом ДСТУ 2839-94 час витримки при гартуванні та старінні, що пов'язано з підвищеною кількістю інтерметалідів на основі заліза в структурі сплавів, які гальмують перебіг дифузійних процесів.

Доведено, що несприятлива форма та розміри виділень фази Al_5SiFe збільшує тепловий опір між матрицею та зоною оплавлення, що позначається на зменшенні глибини зміцненого шару під час лазерної обробки. Це виявило необхідність обов'язкового застосування попередньої операції модифікування для силумінів з підвищеним вмістом заліза.

Доведено, що лазерна обробка викликає підвищення зносостійкості вторинних силумінів в умовах абразивного зношування та при сухому терті «метал по металу» внаслідок утворення у поверхневому шарі високодисперсної структури. При цьому концентрація заліза в інтервалі 0,40...1,45 мас. % на ці показники практично не впливає, що розширює перспективи використання вторинних силумінів з підвищеним вмістом заліза.

Встановлено, що збільшення вмісту заліза призводить до зростання швидкості корозії вторинних силумінів у розчинах 3 % NaCl + 0,1 % H_2O_2 та 10 % HCl. Після імпульсної лазерної обробки швидкість корозії зразків у середовищі 3 % NaCl + 0,1 % H_2O_2 була в 5...7 разів, а у середовищі 10 % HCl на 2...3 порядки нижчою за швидкість корозії вихідних сплавів.

Запропановані технічні рішення сприяють підвищенню якості вторинних силумінів до рівня, який дозволяє використовувати їх як сировину для виготовлення сплавів на основі алюмінію.

Висновки

1. Виконані дослідження виявили, що якісні Al-Si сплави можна отримати із вторинної сировини при помітному вмісті заліза (до 1,45 мас. %) за рахунок застосування рафінувально-модифікувальної обробки.

2. Оскільки залізовмісні інтерметаліди гальмують дифузійні процеси під час термічної обробки, то при збільшенні їх кількості в структурі сплавів потрібно збільшувати час витримки при гартуванні та особливо при старінні.

3. Доцільно збільшувати час витримки при старінні замість використання додаткового відпалу після лазерної обробки.

4. В цілому ефективність як термічної обробки, так і поверхневого лазерного зміцнення залежить багато в чому від попереднього модифікування, яке дозволяє вплинути на виділення найбільш шкідливого інтерметаліду на основі заліза – Al_5SiFe , і, відповідно, на можливість залізовмісних фаз трансформуватись під впливом інших видів обробки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Волчок, И. П. Применение вторичных алюминевых сплавов в транспортном машиностроении / И. П. Волчок, О. В. Лютова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2007. – Вип. 14. – С. 225–227.
2. Волчок, И. П. Термическая обработка железосодержащих силуминов / И. П. Волчок, Е. Л. Скуйбеда // Литье и металлургия. – 2012. – № 3 (67). – С. 94–97.
3. Ищенко, А. А. Об использовании отходов алюминиевой тары / А. А. Ищенко, С. И. Андреев, Д. С. Андреев // Металлургия машиностроения. – 2012. – № 5. – С. 18–19.
4. Лютова, О. В. Свариваемость вторичных силуминов / О. В. Лютова, И. П. Волчок // Стр-во, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. – Вып. 58. – Д. : ГВУЗ «ПГАСиА», 2011. – С. 440–445.
5. Немененок, Б. М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов : моногр. / Б. М. Немененок. – Минск : Технопринт, 1999. – 272 с.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

6. Пат. 42653 Україна, МПК (2009) C22C 1/100. Модифікатор алюмінієвих сплавів / Волчок І. П., Міт'яєв О. А., Островська А. Є., Скуйбіда О. Л. (Україна); заявник та патентовласник Запорізь. націон. техн. ун-т. – № u200902454; заявл. 19.03.2009; опубл. 10.07.2009, Бюл. № 13. – 4 с.
7. Пат. 32929 Україна, МПК (2006) C22C1/00. Модифікатор для алюмінієвих сплавів / Волчок І. П., Міт'яєв О. А., Лютова О. В., Широкобокова Н. В., Повзло В. М. (Україна); заявник та патентовласник Запорізь. націон. техн. ун-т. – № 200800105; заявл. 02.01.2008; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11. – 4 с.
8. Пат. 69720 Україна, МПК C22 C1/06(2006.1). Рафінувально-модифікувальний комплекс для алюмінієвих сплавів / Широкобокова Н. В., Міт'яєв О. А., Волчок І. П., Кюрчев С. В., Колодій О. С. (Україна); заявник та патентовласник Запорізь. націон. техн. ун-т. – № u201112705; заявл. 31.10.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9. – 4 с.
9. Пат. 31862 Україна, МПК (2006) C22B21/00 C22B9/00. Флюс для оброблення алюмінієвих сплавів / Волчок І. П., Міт'яєв О. А., Лютова О. В., Широкобокова Н. В., Повзло В. М. (Україна); заявник та патентовласник Запорізь. націон. техн. ун-т. – № 200713840; заявл. 10.12.2007; опубл. 25.04.2008, Бюл. № 8. – 4 с.
10. Пат. 44463 Україна, МПК (2009) C22B 1/00, C22B 9/00. Флюс для оброблення алюмінієвих сплавів / Волчок І. П., Міт'яєв О. А., Островська А. Є., Скуйбіда О. Л. (Україна); заявник та патентовласник Запорізь. націон. техн. ун-т. – № 200902450; заявл. 19.03.2009; опубл. 12.10.2009, Бюл. № 19. – 4 с.
11. Скуйбеда, Е. Л. Особенности изменения морфологии железистых интерметаллидов в структуре вторичных силуминов под воздействием термической обработки / Е. Л. Скуйбеда // *Литье и металлургия*. – 2013. – № 4 (73). – С. 42–44.
12. Скуйбіда, О. Л. Підвищення механічних властивостей вторинного силуміну АК5М2 / О. Л. Скуйбіда, І. П. Волчок // *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. – Д., 2010. – Вип. 34. – С. 215–218.
13. Cao Xinjin. Morphology of β -Al₅FeSi Phase in Al-Si Cast Alloys [Електронний ресурс] / Xinjin Cao, John Campbell // *Materials Transactions*. – 2006. – Vol. 47, № 5 (2006). – P. 1303–1312. – Режим доступу: <http://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/47/05/1303.pdf>. – Назва з екрана. – Перевірено: 25.09.2014. doi: 10.2320/materials.47.1303.
14. Gorny, Anton. Characterization of Major Intermetallic Phases in solidified Al-xSi-yFe-zSr (x = 2 to 12,5 wt. %, y = 0 to 0,5 wt. % and z = 0 and 0,02 wt. %) alloys : (Open Access Dissertations and Theses. Paper 7445) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://digitalcommons.mcmaster.ca/opendissertations/7445/>. – Назва з екрана. – Перевірено: 25.09.2014.
15. Mityayev, A. The role of intermetallic phases in fracture of aluminium alloys / A. Mityayev, S. Belikov, K. Loza // *Problems of modern techniques in engineering and education*. – Cracow, 2009. – P. 59–66.

И. П. ВОЛЧОК^{1*}, Е. Л. СКУЙБЕДА², О. В. ЛЮТОВА³, Н. В. ШИРОКОБОКОВА⁴

^{1*}Каф. «Технология металлов», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (061) 764 13 51, эл. почта tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0003-1580-0556

²Каф. «Охрана труда и окружающей среды», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (050) 972 40 73, эл. почта eskuibeda@gmail.com, ORCID 0000-0003-1488-8568

³Каф. «Начертательная геометрия, инженерная и компьютерная графика», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (097) 141 85 66, эл. почта lyutova2014@gmail.com, ORCID 0000-0002-8818-2608

⁴Каф. «Технология металлов», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (093) 817 13 44, эл. почта tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0002-7009-6218

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВТОРИЧНЫХ СИЛУМИНОВ ПУТЁМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАФИНИРУЮЩЕ-МОДИФИЦИРУЮЩЕЙ, ТЕРМИЧЕСКОЙ И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТОК

Цель. Вторичным силуминам свойственно, как правило, более низкое, по сравнению с их первичными аналогами, качество. При изготовлении сплавов не учитывается наличие большого количества интерметаллидов, в первую очередь, на основе железа, в их структуре. Для достижения оптимального уровня свойств необходимо искать пути адаптации рафинирующе-модифицирующей, термической и лазерной обработок к особенностям структуры вторичных Al-Si сплавов. **Методика.** Исследования проводили с использованием стандартных мето-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

дик металлографического анализа, определения литейных, механических и эксплуатационных свойств сплавов по ротатбельным планам многофакторных экспериментов. **Результаты.** Установлено, что рафинирующе-модифицирующая обработка является обязательной операцией при производстве вторичных силуминов, поскольку позволяет эффективно влиять на выделения железосодержащих фаз, изменяя их морфологию, размер и распределение, а также повышать эффективность дальнейшей обработки в твёрдом состоянии. Обнаружено, что стандартные режимы термической обработки не являются оптимальными для вторичных силуминов. Лазерная обработка показала высокую эффективность в повышении прочности, износостойкости, коррозионной и кавитационной стойкости вторичных Al-Si сплавов, а повышенное содержание железа способствовало дополнительному твёрдорастворному упрочнению. **Научная новизна.** Установлено, что после рафинирующе-модифицирующей обработки фаза Al_5SiFe , кристаллизующаяся в виде длинных вытянутых пластин, трансформируется в фазу $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$ в скелетообразной или многогранной форме. Получена зависимость между содержанием железа во вторичных силуминах и временем выдержки при термической обработке, которое обеспечивает оптимум механических свойств. Доказано, что наличие железосодержащих интерметаллидов Al_5SiFe приводит к уменьшению глубины упрочнённого слоя при лазерной обработке. Установлено, что с повышением концентрации железа скорость коррозии вторичных силуминов в средах 3 % NaCl + 0,1 % H_2O_2 та 10 % HCl повышается. **Практическая значимость.** Предложенные технические решения способствуют повышению качества вторичных силуминов до уровня, который позволяет использовать их как сырьё для изготовления сплавов на основе алюминия.

Ключевые слова: силумины; модифицирование; термическая обработка; импульсная лазерная обработка; литейные, механические и эксплуатационные свойства

I. P. VOLCHOK^{1*}, O. L. SKUIBIDA², O. V. LIUTOVA³, N. V. SHYROKOBOKOVA⁴

^{1*}Dep. «Metal Technology», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (061) 764 13 91, e-mail tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0003-1580-0556

²Dep. «Labour and Environment Protection», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (050) 972 40 73, e-mail eskuybeda@gmail.com, ORCID 0000-0003-1488-8568

³Dep. «Descriptive Geometry, Engineering and Computer Graphics», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (097) 141 85 66, e-mail lyutova2014@gmail.com, ORCID 0000-0002-8818-2608

⁴Dep. «Metal Technology», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (093) 817 13 44, e-mail tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0002-7009-6218

QUALITY IMPROVEMENT OF SECONDARY SILUMINS BY USING REFINING-MODIFYING, HEAT AND LASER TREATMENTS

Purpose. As a rule secondary silumins are characterized by lower quality than their primary analogues. During manufacture of alloys a large quantity of intermetallides, first of all on the basis of iron, in their structure is ignored. To achieve the optimum level of properties it is necessary to search for ways to adapt refining-modifying, heat and laser treatments to peculiarities of the structure of secondary Al-Si alloys. **Methodology.** The research was carried out by using standard methods of metallographic analysis, determination of foundry, mechanical and service properties of alloys according to rotatable plans of multifactor experiments. **Findings.** It was established, that refining-modifying treatment is a required procedure during manufacture of secondary silumins as it permits to effectively influence the iron-containing phases' segregations by changing their morphology, size and distribution and to increase the effectiveness of further treatment in solid state. It was found that standard modes of heat treatment are not optimal for secondary silumins. Laser treatment has shown high effectiveness in increasing of strength, wear resistance, corrosion and cavitation resistance of secondary Al-Si alloys, and the increased iron content contributed to additional solid solution hardening. **Originality.** It was established, that after refining-modifying treatment the phase Al_5SiFe , which crystallizes in the shape of long stretched plates transformed into phase $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$ in skeletal or polyhedral shape. The relationship between iron content in secondary silumins and holding time during heat treatment that ensures optimum of mechanical properties was obtained. It was proved that the presence of iron-containing intermetallides Al_5SiFe results in the decrease of hardened layer's depth during laser treatment. It was established, that with increasing of iron concentration the corrosion rate of secondary silumins in 3 % NaCl + 0.1 % H_2O_2 and 10 % HCl environments increases. **Practical value.** The offered technical solutions are instrumental in upgrading second silumins to the level which allows to utilize them as raw material for making of alloys on the basis of aluminium.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Keywords: silumins; modification; heat treatment; pulse laser treatment; foundry, mechanical and service properties

REFERENCES

1. Volchok I.P., Lyutova O.V. Primeneniye vtorichnykh alyuminiyevykh splavov v transportnom mashinostroyeni [Use of secondary aluminium alloys in transport engineering]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2007, issue 14, pp. 225-227.
2. Volchok I.P., Skuybeda Ye.L. Termicheskaya obrabotka zhelezosoderzhashchikh siluminov [Heat treatment of iron-containing silumins]. *Litye i metallurgiya – Foundry and metallurgy*, 2012, no. 3 (67), pp. 94-97.
3. Ishchenko A.A., Andreyev S.I., Andreyev D.S. Ob ispolzovanii otkhodov alyuminiyevoy tary [About usage of waste of aluminium containers]. *Metallurgiya mashinostroyeniya – Metallurgy of engineering*, 2012, no. 5, pp. 18-19.
4. Lyutova O.V., Volchok I.P. Svarivayemost vtorichnykh siluminov [Weld ability of secondary silumins]. *Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye* [Construction, material science, machine building], Dnipropetrovsk, 2011, issue 58, pp. 440-445.
5. Nemenenok B.M. *Teoriya i praktika kompleksnogo modifitsirovaniya siluminov* [Theory and practice of silumins complex modification]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 1999. 272 p.
6. Volchok I.P., Mitiaiev O.A., Ostrovska A.Ye., Skuibida O.L. *Modyfikator aliuminiyevykh splaviv* [Modifier of aluminium alloys]. Patent UA, no. u200902454, 2009.
7. Volchok I.P., Mitiaiev O.A., Lyutova O.V., Shyrokobokova N.V., Povzlo V.M. *Modyfikator dlia aliuminiyevykh splaviv* [Modifier for aluminium alloys]. Patent UA, no. 200800105, 2008.
8. Shyrokobokova N.V., Mitiaiev O.A., Volchok I.P., Kiurchev S.V., Kolodii O.S. *Rafinuvanno-modyfikovalnyi kompleks dlia aliuminiyevykh splaviv* [Refining and modifying complex for aluminium alloys]. Patent UA, no. u201112705, 2012.
9. Volchok I.P., Mitiaiev O.A., Lyutova O.V., Shyrokobokova N.V., Povzlo V.M. *Flius dlia obroblenniia aliuminiyevykh splaviv* [Flux for aluminium alloys processing]. Patent UA, no. 200713840, 2008.
10. Volchok I.P., Mitiaiev O.A., Ostrovska A.Ye., Skuibida O.L. *Flius dlia obroblenniia aliuminiyevykh splaviv* [Flux for aluminium alloys processing]. Patent UA, no. 200902450, 2009.
11. Skuybeda Ye.L. Osobennosti izmeneniya morfologii zhelezistykh intermetallidov v strukture vtorichnykh siluminov pod vozdeystviem termicheskoy obrabotki [Peculiarities of changes of iron-based intermetallides morphology in the structure of secondary silumins under the influence of heat treatment]. *Litye i metallurgiya – Foundry and metallurgy*, 2013, no. 4 (73), pp. 42-44.
12. Skuibida O.L., Volchok I.P. Pidvyshchennia mekhanichnykh vlastyvoitei vtorynnoho syluminu AK5M2 [Improving of mechanical properties of secondary silumin AK5M2]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 34, pp. 215-218.
13. Xinjin C., Campbell J. *Morphology of β -Al₃FeSi Phase in Al-Si Cast Alloys*. *Materials Transactions*, 2006, vol. 47, no. 5 (2006), pp. 1303-1312. Available at: <http://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/47/05/1303.pdf> (Accessed 25 September 2014). doi: 10.2320/matertrans.47.1303.
14. Gorny A. Characterization of Major Intermetallic Phases in solidified Al-xSi-yFe-zSr (x = 2 to 12,5 wt. %, y = 0 to 0,5 wt. % and z = 0 and 0,02 wt. %) alloys : (Open Access Dissertations and Theses. Paper 7445). Available at: <http://digitalcommons.mcmaster.ca/opensdissertations/7445/> (Accessed 25 September 2014).
15. Mityayev A. The role of intermetallic phases in fracture of aluminium alloys. *Problems of modern techniques in engineering and education*. Cracow, 2009, pp. 59-66.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., доц. М. М. Бриковим (Україна); д.т.н., проф. І. О. Вакулєнком (Україна)

Надійшла до редколегії: 20.05.2014

Прийнята до друку: 14.08.2014