

ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ
МАТЕРІАЛІВ ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 669.715:621.785

НИЗЬКОТОКСИЧНИЙ ФЛЮС ДЛЯ ОБРОБКИ AL-SI СПЛАВІВ, ОТРИМАНИХ
РЕЦИКЛІНГОМ ЛОМУ ТА ВІДХОДІВ

О. Л. СКУЙБИДА*

Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, УКРАЇНА
*email: eskuymbida@gmail.com

АНОТАЦІЯ Розглянуті еколого-економічні аспекти використання вторинної сировини для виробництва алюмінієвих сплавів. Розроблено флюс для рафінування та часткового модифікування Al-Si сплавів, отриманих шляхом рециклінгу. Встановлено, що використання даного флюсу дозволяє отримати щільні відливки, сприятливу дрібнодисперсну структуру та порівняно високий рівень механічних властивостей вторинного силуміну АК9М2. Показано, що розроблений флюс є низькотоксичним препаратом

Ключові слова: рециклінг, клас небезпеки, флюс, токсичність, вторинна сировина, силумін

АННОТАЦИЯ Рассмотрены эколого-экономические аспекты использования вторичного сырья для производства алюминиевых сплавов. Разработан флюс для рафинирования и частичного модифицирования Al-Si сплавов, полученных путём рециклинга. Установлено, что использование данного флюса позволяет получить плотные отливки, благоприятную мелкодисперсную структуру и сравнительно высокий уровень механических свойств вторичного силумина АК9М2. Показано, что разработанный флюс является низкотоксичным

Ключевые слова: рециклинг, класс опасности, флюс, токсичность, вторичное сырьё, силумин

LOW-TOXIC FLUX FOR TREATMENT OF AL-SI ALLOYS MADE BY
RECYCLING OF SCRAPE AND WASTE

O. SKUIBIDA*

* Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, UKRAINE

ABSTRACT The paper is devoted to solving an important scientific, technical and ecological problem – improving the quality of Al-Si alloys made from secondary materials. Use of scrape and waste leads to a significant reduction of energy costs, decrease of use of non-renewable energy sources and ores compared with the production of primary alloys, and reduces anthropogenic impact on the environment. The aim is to create a low-toxic refining flux, which provides low gas saturation, obtaining dense defect-free castings, improving the structure and mechanical properties of recycled aluminum alloys. Using fine-grained powders and carbonates the flux was designed. It consists mainly of components without class of danger or substances of the 3-4 class of danger; so it is low-toxic and favorable from the point of safety, labour and the environment protection. In the amount near 1 % of the metal it provides protection against oxidation and effectively refines from oxides and hydrides, positively influences on the structure of secondary silumin АК9М2. The components of the flux helps to remove dissolved hydrogen and oxide inclusions, reduces the sizes and favorable changes the shape of silicon- and iron-based phases. Flux treatment provided the improvement of mechanical properties of the alloy compared with untreated condition: hardness increased on 36%, tensile strength - 35% and relative elongation - 50%. The complex is not inferior to the effectiveness of similar common fluxes. The level of mechanical properties satisfied the requirements of ДСТУ 2839-94.

Keywords: recycling, class of danger, flux, toxicity, secondary raw materials, silumin

Вступ

В сучасних умовах алюміній та сплави на його основі є одними з найбільш затребуваних та перспективних матеріалів. Головною

проблемою рециклінгу алюмінієвих сплавів є порівняно низька якість готової продукції. Вторинні алюмінієві сплави мають широкий інтервал вмісту основних компонентів та

значну кількість домішок в складі, характеризуються підвищеною газонасиченістю. Вітчизняна та зарубіжна металургійна практика свідчать про можливості суттєвого підвищення якості вторинних сплавів і використання їх замість первинних аналогів, а також сталей та чавунів. Флюсове рафінування є ефективним, простим, технологічним і економічним методом очищення алюмінієвих сплавів від водню та оксидів алюмінію, і його можна рекомендувати для обробки силумінів, виготовлених із вторинної сировини. Сьогодні основною проблемою є широке використання токсичних екологічно небезпечних рафінувальних флюсів, а також їх низька ефективність. Відповідно, виникає потреба в розробці рафінувальних флюсів, які б забезпечували вилучення водню та оксидів алюмінію при плавленні, позитивно впливали на всі структурні складові силумінів на основі вторинної сировини, подрібнюючи частинки виділень фаз або змінюючи їх морфологію, підвищували однорідність структури і забезпечували стабільні механічні та експлуатаційні властивості виливків за мінімального негативного впливу на довкілля, виробничий персонал та населення.

Мета роботи

Метою роботи є створення низькотоксичного рафінувального комплексу, який забезпечує зниження газонасиченості, отримання щільних бездефектних відливок, покращення структури та підвищення механічних властивостей алюмінієвих сплавів, отриманих шляхом рециклінгу.

Викладення основного матеріалу

Електролітичний спосіб отримання алюмінію з глинозему забезпечує вихід продукції високої якості, проте пов'язаний з низкою недоліків: небезпечними умовами праці виробничого персоналу, забрудненням довкілля, накопиченням відходів та вичерпуванням природних ресурсів. Зокрема, на виробництво 1 т первинного алюмінію необхідно затратити близько 14...16 тис. кВт·год електроенергії. При цьому в навколишнє середовище потрапляє 3...3,5 кг CO, 11...12 кг NO₂, 2...2,5 кг SO₂, 2...2,5 кг органічних кислот, 5,5...6 кг сажі, 6,5...7,7 кг C_nH_{2n+2}, 2600...2650 кг (CO+CO₂) та інших шкідливих речовин [1], які є причиною руйнування озонового шару, кислотних опадів,

смогу. Електроліз алюмінію супроводжується викидом твердих фторидів [2] у вигляді пилу електрофільтрів (13...20 кг/т алюмінію), шламів газоочищення (10...13 кг/т алюмінію), хвостів флотації вугільного пилу (10...25 кг/т алюмінію).

Основна частина твердих відходів накопичується на шламових полях. Найбільшу екологічну небезпеку для довкілля становлять кріоліт, хіоліт, фториди алюмінію та натрію. Надходження в довкілля забруднювачів викликає серцево-судинні захворювання, порушення кровообігу, ураження нервової системи, розвиток хронічного бронхіту та раку легень. Оскільки більшість алюмінієвих підприємств обладнана лише циклонами, то газу, які утворюються, повністю потрапляють у навколишнє середовище, а очищення від пилу не перевищує 90 %. На границі санітарно-захисної зони та території підприємства спостерігається перевищення ГДК за пилом до 2...3,5 разів, а за оксидом вуглецю – до 1,2...1,6 разів. На границі санітарно-захисної та житлової зон – перевищення за пилом в 1,1...1,4 рази [3].

Металургія алюмінію на базі вторинної сировини має низку переваг в порівнянні з використанням руди. В першу чергу підприємства, які виготовляють вторинні сплави, виконують екологічну функцію: сприяють економії основної сировини, запобігають надмірному забрудненню водойм, ґрунтів та повітряного басейну. Використання лому та відходів дозволяє вирішити проблему накопичення низькосортного брухту, утилізувати його та отримати матеріал, що може замінити первинний аналог. Використання вторинних ресурсів дозволяє суттєво підвищити техніко-економічні показники виробництва за рахунок зниження собівартості алюмінієвих сплавів на 25...50 %. Так, для отримання 1 т вторинних алюмінієвих сплавів використовується в 2,4...6 разів менше сировини та в 10...23 рази менше електроенергії, ніж для 1 т первинного алюмінію [4]. Рециклінг алюмінієвих сплавів дозволяє зменшити капітальні вкладення в 6...10 разів.

Впровадження ресурсозберігаючих технологій та збільшення строків служби обладнання призвели до зниження темпів утворення брухту при одночасному збільшенні потреби в новому металі. В Європейському Союзі нині випускається близько 5,1 млн. т первинного та 5,2 млн. т вторинного алюмінію на рік. Разом з тим вторинна переробка

алюмінію ускладнена утворенням шлаку, частка якого може складати 9...18 % від маси розплавленого алюмінію. Зі збільшення шлакоутворення зростають втрати металевого алюмінію (разом зі шлаком та у вигляді оксиду). В шлаках містяться нітриди, сульфіди, карбіди алюмінію, які здатні до гідролізу. В дощову погоду вони виділяються у вигляді аміаку, ацетилену, пропану та сірководню, тобто речовин 2...4 класу небезпеки.

Постійне підвищення вимог до якості литих заготовок обумовлює недостатню ефективність простого переплавлення вторинної сировини [5-8]. Традиційна технологія отримання силумінів шляхом рециклінгу передбачає переплав лому під покривним флюсом з наступним рафінуванням розплаву. Аналіз об'ємів та складів пилогазових викидів, які утворюються при виробництві алюмінієвих сплавів показав, що основну небезпеку в екологічному контексті мають процеси рафінувальної обробки.

В більшості випадків для рафінування використовують флюси системи NaCl-KCl-Na₃AlF₆, калієвий кріоліт, фтористий алюміній, кремнійфтористий натрій та калій, фтористий та хлористий літій, що пояснює присутність у відходящих газах значної кількості хлоридів та фторидів, які відносяться до 2-го класу небезпеки. Тому низку екологічних проблем, які виникають при плавленні та рафінуванні, можна успішно вирішити при використанні низькотоксичних рафінувальних флюсів. Недосконала технологія переробки позначається на низькій якості вторинних силумінів. Зокрема, широке використання силумінів в машинобудуванні передбачає їх контакт з різними середовищами [9], тому окрім затребуваного високого рівня механічних та експлуатаційних властивостей сплави повинні мати і високу корозійну стійкість.

Управління металургійними факторами не потребує значних витрат, дозволяючи при цьому впливати на процеси структуроутворення, а, відповідно, і якість відливок з високою ефективністю. Силуміни, виготовлені з лому та відходів виробництва, є складними багатокомпонентними системами з великою кількістю розчинених газів, неметалевих вкраплень, надлишкових фаз кристалізаційного походження та вторинних виділень, неоднорідною і крупнозернистою структурою, що, в свою чергу, обумовлює низьку якість готових виробів. Підвищення механічних та технологічних властивостей вторинних алюмінієвих сплавів досягається

переважно позапічною обробкою розплаву, що дозволяє отримати матеріал зі сприятливою структурою, а також зменшити вміст водню та оксидів алюмінію. Методи рафінування надійно закріпилися в технологічних процесах завдяки своїй простоті та економічній доцільності при обробці алюмінієвих сплавів, виготовлених з лому та відходів, проте підвищення рівня вимог до якості виливків та екологічної безпеки потребує їх удосконалення.

Відповідно до поставлених задач, нами було розроблено флюс для обробки алюмінієвих сплавів. Даний рафінувальний флюс має наступний склад: 25...30 % NaCl; 3...10 % S; 2,0...5,0 % KBF₄; 1,5...5,0 % Na₂CO₃; 1,5...5,0 % SrCO₃; 0,5...2,0 % Ti; 0,5...0,8 % SiC; 0,2...0,5 % C; решта AlF₃. На експериментальний флюс отримано патент України № 44463. Дослідження проводили на вторинному сплаві АК9М2 наступного хімічного складу: 8,38...8,41 % Si; 1,90...1,91 % Cu; 0,99...1,0 % Fe; 0,83...0,84 % Zn; 0,8 % Mg; 0,26 % Mn; 0,06 % Ni; 0,05 % Ti; решта Al. Плавлення силуміну АК9М2 відбувалось під шаром стандартного флюсу (15 % KCl; 45 % NaCl; 40 % AlF₃). Здійснювали обробку розплаву розробленим флюсом та модифікатором у кількості 1,0 % та 0,1 % відповідно. Дослідження сплаву проводили після термічної обробки за режимом Т6.

Особливістю структури силумінів, отриманих рециклінгом, є наявність великої кількості інтерметалідних фаз, які відіграють роль концентраторів напружень в матеріалі [10-12]. Легування залізовмісної фази сіркою, яка має чотири валентних електрони на зовнішній електронній оболонці, викликає збільшення електронної густини, рівномірності розподілу електронів та втрату направленості зв'язків міжатомної взаємодії. В результаті відбувалась зміна хімічного зв'язку на металевий ненаправлений і кристалізаційні утворення залізовмісних фаз набували сприятливої морфології. За ефективністю впливу дія сірки на залізовмісні фази наближалась до використання лазерної обробки [13-15]. Сірка в складі флюсу забезпечувала сильний рафінувальний вплив на розплав внаслідок утворення значної кількості пароподібного продукту, інтенсивного барботажу металу та пов'язаного з цим видалення оксидних вкраплень і розчиненого водню за адсорбційним і флотаційним механізмами.

Карбонати натрію та стронцію дисоціюють з виділенням вуглекислого газу,

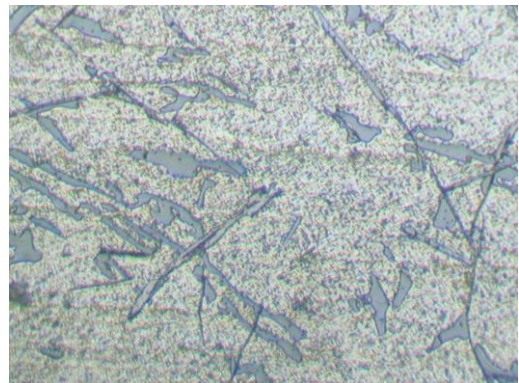
що забезпечувало додаткове рафінування розплаву. Від'ємний ізобарно-ізотермічний потенціал реакції утворення сполуки H_2S ($\Delta G_{1000}^{\circ K} = -41,0$ кДж/моль) дозволяє стверджувати, що сірка зв'язувала розчинений водень та, відповідно, викликала зменшення балу газової пористості у виливках.

Ультрадисперсні частинки карбїду кремнію, а також інтерметалїдів Al_3Ti , що утворювались в розплавї, виконували роль додаткових центрів кристалїзації та сприяли подрїбненню мїкроструктури. Тетрафторборат калїю забезпечував отримання модифїкованих структур евтектичного кремнію, а також підвищував термостабїльнїсть структур за рахунок підвищення температур фазових перетворень. Сіль KBF_4 взаємодїє з алюмінієм за екзотермічною реакцією, яка проходить з відновленням бору та заміщенням його алюмінієм в шлаці. Продуктами реакції є борид та алюмїд титану. Активне пов'язування титану в борид збільшувало його засвоюваність та підвищувало ефективнїсть процесу зародкоутворення, оскїльки частинки B_2Ti виступають підкладинами для зародження зерен (Al) при кристалїзації. Спільне введення титану та тетрафторборату калїю забезпечувало максимальне засвоєння бору.

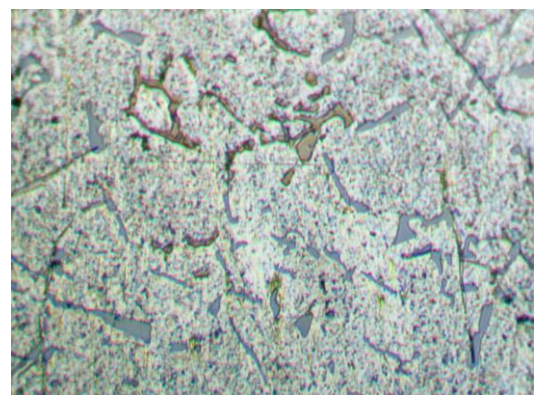
Фторид алюмінію сприяв зменшенню натягу на межї подїлу метал-флюс та розчиненню плївки оксиду алюмінію. Також AlF_3 і S зв'язували домішки вторинних алюмінієвих сплавів в сполуки MgF_2 ($\Delta G_{1073}^{\circ K} = -392$ кДж/моль) та MgS ($\Delta G_{1073}^{\circ K} = -293$ кДж/моль) відповідно, які в подальшому відшлаковувалися. Використання сумїші хлоридів та фтористої солї сприяло збільшенню крайового кута змочування, збільшенню поверхневого натягу та змїцненню плївки на поверхнї сольового розплаву, що збільшувало ефективнїсть процесу рафінування.

Мїкроструктуру зразків після плавлення під стандартним флюсом та термічної обробки за режимом Т6 (обробка 1), а також плавлення під стандартним флюсом, обробки експериментальним флюсом і модифїкатором, а також термічної обробки (обробка 2) подано на рисунку 1. Проведенї дослідження показали, що використання розробленого рафінувального флюсу дозволило отримати більш сприятливу структуру сплаву АК9М2. Спостерїгали формування дрібнодисперсних та рївномїрно розподїлених структурних складових, змїну форми інтерметалїдів на основї залїза з

пластинчастої на многогранну або у виглядї китайських ієрогліфів.



а



б

Рис. 1 – Вплив флюсової обробки на мїкроструктуру сплаву АК9М2 (x400):
 а – обробка 1; б – обробка 2

Двоступенева обробка вторинного сплаву АК9М2 забезпечила формування дрібнозернистої структури, а в зв'язку зі значною спадковїстю алюмінієвих сплавів це дозволяє пояснити вищий рївень механїчних властивостей силумїну (табл. 1) при наступних технологїчних переробках.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень дїї флюсу на механїчні властивостї сплаву АК9М2

Обробка	НВ	σ_B^p , МПа	δ , %
1	70	220	1,2
2	95	297	1,8
ДСТУ	85	274	1,5

Обговорення результатів

Експериментальні плавки показали, що при використанні розробленого флюсу в порівнянні з необробленим станом (плавлення під стандартним флюсом) газова пористість сплаву АК9М2 зменшилась до 1 балу, твердість збільшилась на 25 одиниць за шкалою Брінеля, міцність на 77 МПа, а пластичність зросла в 1,5 рази. Таким чином, розроблений флюс забезпечує комплексний вплив на силуміни, виготовлені із вторинної сировини, захищаючи розплав від окислення, сприяючи вилученню оксидних вкраплень та розчинених газів, а також подрібнюючи структурні складові сплавів. Рівень механічних властивостей вторинного силуміну АК9М2 при застосуванні оптимальної кількості розробленого флюсу (1 % від маси сплаву) задовольняв вимогам ДСТУ 2839-94.

Висновки

Аналіз ситуації на світовому ринку кольорових металів свідчить про невпинне зростання виробництва алюмінієвих сплавів з лому та відходів машинобудівних підприємств. Переробка вторинної алюмінієвої сировини приводить до значного скорочення енергетичних витрат та зменшення обсягів використання непоновлюваних джерел енергії порівняно з виробництвом первинних сплавів, а також дозволяє зменшити техногенне навантаження на довкілля. Утилізація та вторинне використання (рециклінг) металовідходів є однією з найважливіших проблем сучасного машинобудування. Конкурентоспроможність вторинних алюмінієвих сплавів може забезпечуватись не лише нижчою вартістю, але і використанням при їх виробництві технології рафінування.

Розроблено високоефективний екологічно безпечний рафінувально-модифікувальний флюс низької вартості. Комплекс не поступається за ефективністю розповсюдженим флюсам аналогічного призначення. При цьому він містить в своєму складі переважно компоненти, які не мають класу небезпеки або відносяться до 3-4 класу небезпеки, тобто є низькотоксичним та сприятливим в контексті охорони праці та навколишнього середовища.

Список літератури

- 1 **Митяев, А.** Производство вторичного алюминия: технико-экономические и экологические аспекты / А. Митяев, С. Беликов // *Archives of Foundry*. – 2006. – Vol.6, № 20. – P. 85-89.
- 2 **Седых, В. И.** Пути сокращения выбросов фторидов в алюминиевом производстве / В. И. Седых, А.Н. Баранов, А. В. Никаноров, П. Р. Ершов // *Известия вузов. Цветная металлургия*. – 2005. – № 2. – С. 26-28.
- 3 **Лазаренков, А. М.** Рассеивание выбросов вредных веществ от источников литейных цехов в окружающей среде / А. М. Лазаренков, С. А. Хорева // *Литье и металлургия*. – 2012. – № 3 (67). – С. 76-78.
- 4 **Алексахин, А. В.** Эффективность использования вторичных алюминиевых сплавов в литейном производстве / А.В. Алексахин, Н.В. Хмельницкая, Е.К. Сиваева // *Экономические проблемы литейного производства России : тез. докл. Всероссийской конф.* – Пенза, 1991. – С. 52-54.
- 5 **Samoshina, M. E.** Structure and properties of mechanically alloyed composite material from waste of high purity aluminium production / M. E. Samoshina, A. A. Aksenov, A. S. Prosviryakov [та інші] // *Powder Metallurgy*. – 2011. – Vol. 54, № 4. – P. 471-473.
- 6 **Куцова, В. З.** Структура и фазовый состав модифицированных заэветкических поршневых силуминов / В. З. Куцова, О. А. Носко // *Aims for Future of Engineering Science : Proceedings the Fifth International Scientific Forum. Paris, 2-8 May, 2004*. – Paris, France : Paris Tourist Office «David Lefrance», 2004. – P. 56-64.
- 7 **Okamura, H.** Friction stir welding of aluminium alloy and application to structure / H. Okamura, K. Aota, M. Erumi // *J. of Jap. Institute of Light Metals*. – 2000. – № 4 (50). – P. 166-172.
- 8 **Belikov, S.** The nanomodifier of aluminium alloys / S. Belikov, I. Volchok, A. Mityayev // *Aims for Future of Engineering Science: Proceedings the International Scientific Forum. Pavas, 4-10 July 2006*. – Davos Congress Centre, Switzerland, 2006. – P. 191-193.
- 9 **Беліков, С. Б.** Корозійна стійкість вторинних силумінів після лазерної обробки / **С. Б. Беліков, І. П. Волчок, Н. В. Широкобокова** // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2014. – № 10. – С. 264-267.
- 10 **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 2009*. – Cracow, 2009. – P. 59-66.
- 11 **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)

- [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://digitalcommons.mcmaster.ca/opensdissertation/s/7445/>.
- 12 **Сао, Х.** Morphology of β -Al₃FeSi Phase in Al-Si Cast Alloys / X. Cao, J. Campbell // *Materials Transactions*. – 2006. – Vol. 47, № 5. – P. 1303-1312.
 - 13 **Гиржон, В. В.** Формирование структуры поверхностных слоев алюминиевых сплавов после импульсной лазерной обработки / В. В. Гиржон, И. В. Танцюра // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2005. – Т. 27, № 11. – С. 1519-1528.
 - 14 **Гиржон, В. В.** Формирование квазиэвтектической структуры в сплавах АК9 и АК12 после импульсной лазерной обработки / В. В. Гиржон, И. В. Танцюра // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2006. – Т. 28, № 9. – С. 1249-1259.
 - 15 **Volchok, I. P.** Increasing of Microhardness of Al-Si Alloys by Laser Treatment / I.P. Volchok, V.V. Girzhon, I.V. Tantsiura // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2011. – Т. 33, № 8. – С. 1111-1118.
 - 1 **Mityaev, A.** Production of secondary aluminum: technical, economical and ecological perspectives / A. Mityaev, S. Belikov // *Archives of Foundry*. – 2006. – Vol.6, № 20. – P. 85-89.
 - 2 **Sedih, V. I.** Ways of decrease of fluoride wastes in aluminium production / V. I. Sedih, A.N. Baranov, A. V. Nikanorov, P. R. Ershov // *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. – 2005. – № 2. – P. 26-28.
 - 3 **Lazarenkov, A. M.** Dispersion of hazards from sources of foundry sections in the environment / A. M. Lazarenkov, S. A. Khoreva // *Litye i metallurgiya* – 2012. – № 3 (67). – P. 76-78.
 - 4 **Aleksahin, A. V.** The effectiveness of use of secondary aluminium alloys in foundry industry / A.V. Aleksahin, N.V. Khmel'nitskaya, E.K. Sivaeva // *Ekonomicheskiye problemi lityenogo proizvodstva Rossii : thesis of rep. of All-Russian conf.* – Penza, 1991. – P. 52-54.
 - 5 **Samoshina, M. E.** Structure and properties of mechanically alloyed composite material from waste of high purity aluminium production / M. E. Samoshina, A. A. Aksenov, A. S. Prosviryakov [and others] // *Powder Metallurgy*. – 2011. – Vol. 54, № 4. – P. 471-473.
 - 6 **Kutsova, V. Z.** Structure and phase composition of hypereutectic piston silumins / V. Z. Kutsova, O. A. Nosko // *Aims for Future of Engineering Science : Proceedings the Fifth International Scientific Forum. Paris, 2-8 May, 2004*. – Paris, France : Paris Tourist Office «David Lefrance», 2004. – P. 56-64.
 - 7 **Okamura, H.** Friction stir welding of aluminium alloy and application to structure / H. Okamura, K. Aota, M. Erumi // *J. of Jap. Institute of Light Metals*. – 2000. – № 4 (50). – P. 166-172.
 - 8 **Belikov, S.** The nanomodifier of aluminium alloys / S. Belikov, I. Volchok, A. Mityayev // *Aims for Future of Engineering Science: Proceedings the International Scientific Forum. Pavas, 4-10 July 2006*. – Davos Congress Centre, Switzerland, 2006. – P. 191-193.
 - 9 **Belikov, S. B.** Corrosion resistance of secondary silumins after laser treatment / **S. B. Belikov, I. P. Volchok, N. V. Shirokobokova** // *Fiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov*. – 2014. – № 10. – P. 264-267.
 - 10 **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 2009*. – Cracow, 2009. – P. 59-66.
 - 11 **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/>.
 - 12 **Сао, Х.** Morphology of β -Al₃FeSi Phase in Al-Si Cast Alloys / X. Cao, J. Campbell // *Materials Transactions*. – 2006. – Vol. 47, № 5. – P. 1303-1312.
 - 13 **Girzhon, V. V.** Forming of structure of surface layers after impulse laser treatment / V. V. Girzhon, I. V. Tantsiura // *Metallfizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2005. – Vol. 27, № 11. – P. 1519-1528.
 - 14 **Girzhon, V. V.** Forming of quasisutectic structure of of the alloys after impulse laser treatment / V. V. Girzhon, I. V. Tantsiura // *Metallfizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2006. – Vol. 28, № 9. – P. 1249-1259.
 - 15 **Volchok, I. P.** Increasing of Microhardness of Al-Si Alloys by Laser Treatment / I.P. Volchok, V.V. Girzhon, I.V. Tantsiura // *Metallfizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2011. – Т. 33, № 8. – С. 1111-1118.

Надійшла (received) 14.03.2015