

УДК 669.714.004.8

ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВТОРИЧНЫХ СПЛАВОВ АК7ч И А356.2

ВОЛЧОК И.П.¹ *д.т.н., проф.*,
МИТЯЕВ А.А.² *д.т.н., проф.*,
ФРОЛОВ Р.А.^{3*} *аспирант*,
ЛОЗА К. Н.⁴ *к.т.н.*,
КЛОЧИХИН В.В.⁵,
ЛУКИНОВ В. В.⁶

¹кафедра «Композиционные, порошковые материалы и технологии», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (061) 769 82 71, e-mail: tmzntu@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1580-0556

²кафедра «Композиционные, порошковые материалы и технологии», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (061) 769 82 71, e-mail: tmzntu@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9034-1359

^{3*}кафедра «Композиционные, порошковые материалы и технологии», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (061) 769 82 71, e-mail: tmzntu@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9967-0220

⁴АО «Мотор Сич», ул. Моторостроителей, 15, Запорожье, Украина, 69068 тел. +38 (061) 720 48 83, e-mail: loza@motosich.com, ORCID: 0000-0002-2713-5744

⁵АО «Мотор Сич», ул. Моторостроителей, 15, Запорожье, Украина, 69068 тел. +38 (061) 720 48 83

⁶АО «Мотор Сич», ул. Моторостроителей, 15, Запорожье, Украина, 69068 тел. +38 (061) 720 48 83

Аннотация. *Цель.* Оптимизация технологии производства вторичных литейных алюминиевых сплавов АК7ч и А356.2. Изучение влияния модифицирующей обработки на структуру и механические свойства сплавов с различной концентрацией примесей. *Методика.* В качестве материала для исследования выбран сплав АК7ч и его аналог А356.2, а также возврат собственного производства. Плавки с различным составом исходной шихты проводили по заводской и экспериментальной технологиям. Контроль механических свойств осуществляли на образцах, изготовленных согласно ГОСТ 1497-84 после термической обработки по режиму Т6. Контроль микроструктуры выполняли после обработки поверхности шлифа водным раствором кислот 0,5 %HF+0,5 %HNO₃+1,5 %HCl в течение 10с. *Результаты.* Проведенные исследования показали возможность повышения уровня механических свойств вторичных алюминиевых сплавов модифицирующей обработкой. *Научная новизна.* Показано влияние количества модифицирующего комплекса на структуру и свойства вторичного алюминиевого сплава АК7ч. *Практическая значимость.* Даны рекомендации по применению модифицирующего комплекса МК-1 для переработки возвратов из сплавов АК7ч и А356.2.

Ключевые слова: алюминий; интерметаллидные фазы; структура; механические свойства; модифицирующая обработка

ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВТОРИННИХ СПЛАВІВ АК7ч ТА А356.2

ВОЛЧОК І. П.¹ *д.т.н., проф.*,
МІТЯЄВ О. А.² *д.т.н., проф.*,
ФРОЛОВ Р.О.^{3*} *аспірант*,
ЛОЗА К. М.⁴ *к.т.н.*,
КЛОЧИХІН В.В.⁵,
ЛУКІНОВ В. В.⁶

¹кафедра «Композиційні та порошкові матеріали і технології», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (061) 769 83 51, e-mail: tmzntu@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1580-0556

²кафедра «Композиційні та порошкові матеріали і технології», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (061) 769 83 51, e-mail: tmzntu@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9034-1359

^{3*}кафедра «Композиційні та порошкові матеріали і технології», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (061) 769 83 51, e-mail: tmzntu@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9967-0220

⁴АТ «Мотор Січ», вул. Моторобудівників, 15, Запоріжжя, Україна, 69068 тел. +38(061) 720 48 83, e-mail: loza@motosich.com, ORCID: 0000-0002-2713-5744

⁵АТ «Мотор Січ», вул. Моторобудівників, 15, Запоріжжя, Україна, 69068 тел. +38 (061) 720 48 83

⁶АТ «Мотор Січ», вул. Моторобудівників, 15, Запоріжжя, Україна, 69068 тел. +38 (061) 720 48 83

Анотація. Мета. Оптимізація технології виробництва вторинних ливарних алюмінієвих сплавів АК7ч та А356.2. Вивчення впливу модифікувальної обробки на структуру і властивості сплавів із різною концентрацією домішок. **Методика.** В якості матеріалу для дослідження обрано сплав АК7ч, його аналог А356.2 та їх відходи виробництва. Плавки з різним складом вихідної шихти проводили за заводською та експериментальною технологіями. Контроль механічних властивостей здійснювали на зразках, виготовлених згідно ГОСТ 1497-84 після термічної обробки за режимом Т6. Контроль мікроструктури виконували після обробки поверхні шліфа водним розчином кислот 0,5 %HF+0,5 %HNO₃+1,5 %HCl впродовж 10с. **Результати.** Проведені дослідження вказують на можливість підвищення рівня механічних властивостей вторинних алюмінієвих сплавів модифікувальною обробкою. **Наукова новизна.** Показаний вплив кількості модифікувального комплексу на структуру і властивості вторинного алюмінієвого сплаву АК7ч. **Практична значимість.** Надані рекомендації щодо застосування рафінувально-модифікувального комплексу МК-1 при переробці повернень АК7ч та А356.2.

Ключові слова: алюміній; інтерметалідні фази; структура; механічні властивості; модифікувальна обробка

IMPROVED MECHANICAL PROPERTIES SECONDARY ALLOYS АК7ч AND А356.2

VOLCHOK I. P.¹ *Dr. Sc. (Tech.), Prof.,*
MITYAYEV A. A.² *Dr. Sc. (Tech.), Prof.,*
FROLOV R. A.^{3*} *postgraduate,*
LOZA K. N.⁴ *Ph. D.,*
KLOCHIHIN V.V.⁵,
LUKINOV V. V.⁶

¹Department of «Composite, powder materials and technologies», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (061) 769 82 71, e-mail tmzntu@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1580-0556

²Department of «Composite, powder materials and technologies», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (061) 769 82 71, e-mail tmzntu@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9034-1359

^{3*}Department of «Composite, powder materials and technologies», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (061) 769 82 71, e-mail tmzntu@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9967-0220

⁴JSC «Motor Sich», Motorostroiteley St., 15, Zaporizhzhia, Ukraine, 69068, tel. +38 (061) 720 48 83, e-mail tmzntu@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2713-5744

⁵JSC «Motor Sich», Motorostroiteley St., 15, Zaporizhzhia, Ukraine, 69068, tel. +38 (061) 720 48 83

⁶JSC «Motor Sich», Motorostroiteley St., 15, Zaporizhzhia, Ukraine, 69068, tel. +38 (061) 720 48 83

Annotation. Purpose. Optimization of technology processing of the secondary aluminum cast-alloys АК7ч and А356.2. Study of the effect of an inoculation treatment on the structure and properties of alloys containing different concentrations of impurities. **Methodology.** As a material for this study of the alloy АК7ч and its analogue А356.2 and the returns of its own production was chosen. The alloys from different composition of the initial charge was carried out according to the factory and experimental technology. Control of mechanical properties was performed on samples prepared in accordance with GOST 1497-84 after heat treatment at T6 mode. Control of the microstructure was performed on microsection after treatment surface by aquatic solution of acid 0,5 % HF + 0,5 % HNO₃ + 1,5 % HCl during 10s. **Findings.** The ability to improve on the mechanical properties of secondary aluminum alloys modifying treatment has been shown. **Originality.** Influence of the amount of modifying complex on the structure and properties of secondary aluminum alloy АК7ч has been show. **Practical value.** Recommendations on the use of modifying complex МК-1 for processing secondary АК7ч and А356.2 alloys was offered.

Keywords: aluminum; intermetallic phases; structure; mechanical properties; modifying treatment

Введение

Использование вторичного сырья при производстве литых деталей из алюминиевых сплавов снижает производственные затраты на

30...50%. Как правило, шихта, состоящая из вторичных материалов содержит повышенную концентрацию примесей, негативно влияющих на физические и механические свойства отливок[1,2]. В связи с этим, поиск новых, более дешевых методов

переработки возврата алюминиевых сплавов, является актуальной задачей. В настоящее время разработано множество методов повышения эксплуатационных свойств отливок. Среди них обработка расплава импульсным электрическим током [2,10], обработка магнитными полями и импульсами [1,7], ультразвуком [11], наследственное и примесное модифицирование [4,6-8,12]. Поскольку обработка расплава электрическим током, магнитными полями и ультразвуком требует применения дорогостоящего оборудования и существенного изменения технологического процесса, а наследственное модифицирование требует предварительной подготовки шихты, можно сделать вывод о том, что наиболее приемлемым является использование примесных модификаторов.

Цель

Цель работы заключалась в усовершенствовании технологии переработки возврата из сплавов АК7ч собственного производства и А356.2 производства «Алcoa» (Норвегия) на АО «Мотор Сич».

Материал

В качестве материала для настоящего исследования выбран доэвтектический сплав АК7ч и его зарубежный аналог А356.2, а также возврат собственного производства из этих сплавов (табл. 1.).

Таблица 1

Химический состав сплавов, используемых в качестве шихты/ The chemical composition of the alloys used as charge

| Сплав | Содержание элементов, масс. % | | | | | | |
|----------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Ti |
| АК7ч чушка | 6,25 | 0,35 | 0,05 | 0,02 | 0,31 | 0,03 | 0,01 |
| АК7ч возврат | 6,72 | 0,60 | 0,05 | 0,08 | 0,32 | 0,02 | 0,01 |
| А356.2 чушка | 6,21 | 0,07 | 0,01 | 0,02 | 0,36 | 0,01 | 0,11 |
| А356.2 возврат | 7,07 | 0,11 | 0,02 | 0,02 | 0,23 | 0,03 | 0,07 |

Методика

Шихту расплавляли в электрической печи сопротивления. Заводская технология (плавки №№ 7, 9 табл.2) заключалась в обработке расплава при температуре 720°C модификатором K_2ZrF_6 путем замешивания его на зеркале чистого металла. Экспериментальная технология состояла в подаче модифицирующего комплекса МК-1 [9] с помощью «колокольчика» на дно тигля при той же температуре сплава.

Из металла каждой плавки в кокиль отливали призматический слиток массой 3кг. После термической обработки по режиму Т6 согласно ГОСТ 1583-93 изготавливали шлифы для изучения

микроструктуры и образцы для механических испытаний. Микроструктуру изучали на оптическом микроскопе SIGETA MM-700 при увеличении в 500 раз после обработки поверхности шлифа водным раствором кислот 0,5 %HF+0,5 %HNO₃+1,5 %HCl в течение 10с. Механические испытания соответствовали требованиям ГОСТ 1497-84.

Результаты

Основными факторами, определяющими качество деталей, изготовленных из литых алюминиевых сплавов, являются размеры и форма включений кремния и железосодержащих фаз типа Al₃Fe, Al₂SiFe, Al₅SiFe.

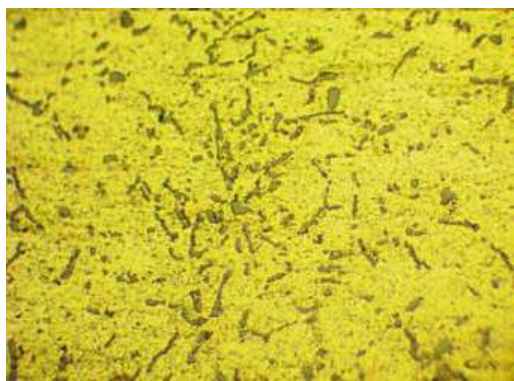
Таблица 2

Характеристика экспериментальных плавков/ Characteristics of experimental melting

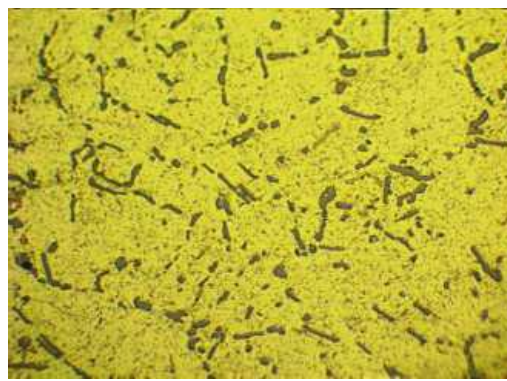
| № плавки | Состав шихты | Количество и тип модификатора |
|----------|------------------------------------|---|
| 1 | 50% перв. АК7ч 50% возв. А356.2 | 0,05 масс.% МК-1 |
| 2 | | 0,10 масс.% МК-1 |
| 3 | | 0,15 масс.% МК-1 |
| 4 | 50% перв. А356.2 50% возв. АК7ч | 0,05 масс.% МК-1 |
| 5 | | 0,10 масс.% МК-1 |
| 6 | | 0,15 масс.% МК-1 |
| 7 | 100% возв. АК7ч | 1,0 масс. % K ₂ ZrF ₆ |
| 8 | | 0,15 масс. % МК-1 |
| 9 | 100% возв. 356.2 | 1,0 масс. % K ₂ ZrF ₆ |
| 10 | | 0,10 масс. % МК-1 |

Известно [7,13], что интерметаллиды не когерентно связаны с металлической матрицей, препятствуют движению дислокаций и являются концентраторами напряжений. Вследствие этого при незначительных размерах и количестве они могут приводить к повышению прочности и твердости при некотором снижении пластичности. С ростом количества, размеров и параметра формы интерметаллидных включений затрудняется движение дислокаций и как следствие этого, происходит снижение механических свойств алюминиевых сплавов.

Анализ структуры (рис. 1) сплава, состоящего из 50 % первичного АК7ч + 50 % возврата А356.2 (плавки №№1, 2, 3), при содержании железа 0,23 %, свидетельствует о существенном влиянии величины присадки МК-1 на структуру сплава: с увеличением присадки с 0,05 % до 0,10 % произошло заметное уменьшение интерметаллидной фазы и включений кремния (см. рис. 1а, б).



a



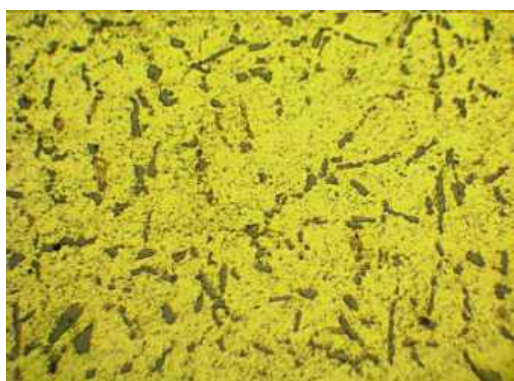
a



б



б



в



в

Рис. 1. Микроструктура плавков x500: а – плавка №1; б - плавка №2; в - плавка №3 / Microstructure of the melting x500: a – melting №1; б - melting №2; в - melting №3

Рис. 2. Микроструктура плавков x500: а – плавка №3; б - плавка №4; в - плавка №5 / Microstructure of the melting x500: a – melting №1; б - melting №2; в - melting №3

При увеличении модифицирующей присадки до 0,15 % наблюдалось увеличение основных структурных составляющих, что свидетельствует о начале явления перемодифицирования сплава (см. рис. 1.в).

Для сплава, состоящего из 50 % возврата АК7ч + 50 % первичного А356.2 (плавки №№4, 5, 6), при содержании железа 0,34 % изменение микроструктуры сплава (рис.2) от величины присадки модифицирующего комплекса было аналогичным плавками №№ 1, 2, 3. Соответственно имело место сначала увеличение показателей механических свойств, а затем их снижение (рис.3).

Отличие между плавками №№1-3 и №№4-6 заключалось в том, что во втором случае вследствие более высокого содержания железа, показатели механических свойств были ниже, чем в первом для плавков №№1-3.

Плавки №№7, 8 проводились на шихте, состоящей из 100% возврата АК7ч, с целью сравнения заводской и экспериментальной технологий модифицирования. Поскольку в возврате АК7ч имела место высокая концентрация Fe (см. табл.1), то количество применяемого модификатора по экспериментальной технологии было увеличено до 0,15%. Металлографический анализ показал, что

применение в качестве модификатора K_2ZrF_6 не обеспечило необходимого изменения интерметаллидной фазы (рис 4.а). Этот вывод подтвердился низкими показателями прочности и пластичности (см. рис. 3).

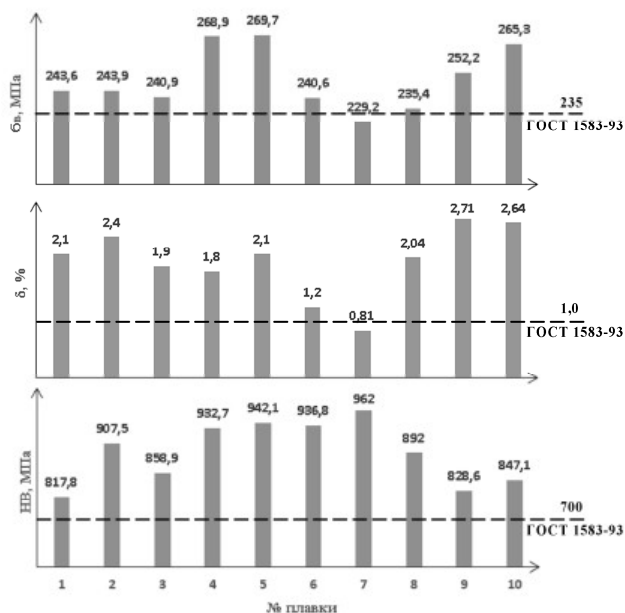


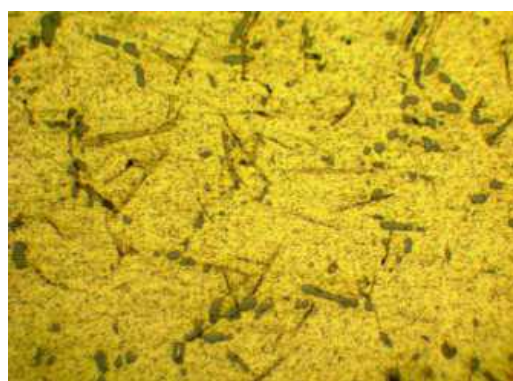
Рис. 3. Механические свойства опытных плавки / Mechanical properties of experimental melting

В то же время применение модифицирующего комплекса МК-1 позволило получить равномерное распределение и благоприятную форму структурных составляющих (см. рис.4б). Показатели механических свойств при этом удовлетворяли требованиям ГОСТ 1583-93.

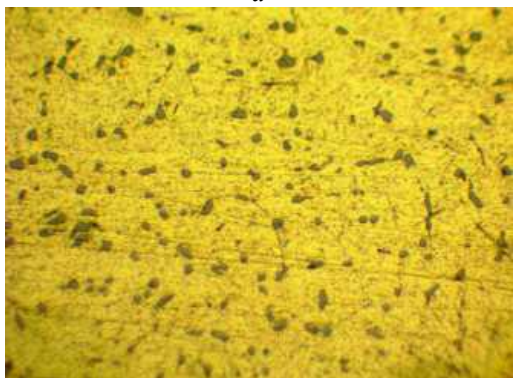
Плавки №№9, 10 проводились на наиболее чистой шихте, состоящей из 100% возврата А356.2. Микроструктура плавки обработанной по заводской технологии (рис.5а) показывает, что K_2ZrF_6 отлично справляется с диспергированием кремния, но все также слабо влияет на интерметаллиды, в отличие от МК-1 (см. рис.5.б). При низкой концентрации железа оба варианта обработки обеспечили требуемый стандартом уровень механических свойств.

Научная новизна и практическая ценность

Результаты исследования показали, что количество модификатора, необходимое для получения оптимальной структуры и механических свойств зависит от концентрации примесей, в частности, железа. Установлено что для получения качественных отливок из сплава АК7ч с низким содержанием железа оптимальным является 0,05...0,10 % модифицирующего комплекса МК-1, а для сплавов с высоким содержанием железа - 0,10...0,15 %, что согласуется с полученными ранее результатами [3, 5].

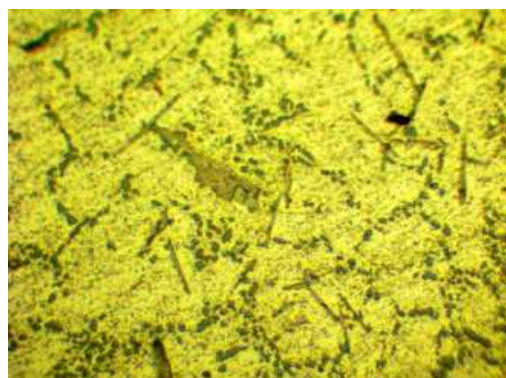


а

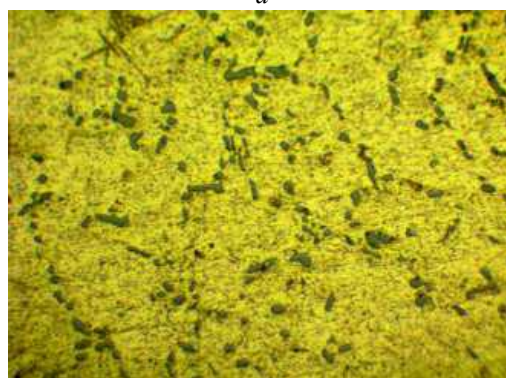


б

Рис. 4. Микроструктура плавки x500: а – плавка №7; б - плавка №8 / Microstructure of the melting x500: а – melting №7; б - melting №8



а



б

Рис. 5. Микроструктура плавки x500: а – плавка №9; б - плавка №10 / Microstructure of the melting x500: а – melting №9; б - melting №10

Выводы

Результаты исследований показали, что:

1. Заводская технология обработки расплава модификатором K_2ZrF_6 не обеспечила необходимый высокий уровень механических свойств при использовании шихты с высокой концентрацией железа, так как данный тип модификатора практически не влияет на форму интерметаллидных фаз.

2. Модифицирующий комплекс МК-1 оказывает сильное воздействие на кремний и железосодержащие фазы, при этом его количество необходимо согласовывать с концентрацией Fe в сплаве для получения оптимальных структуры и механических свойств.

3. Получение качественных отливок возможно из шихты, состоящей из 100% возврата с содержанием Fe 0,60 % при обработке расплава модифицирующим комплексом МК-1.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Деев В. Б. Модифицирующий эффект физических воздействий на расплавы в ресурсосберегающих технологиях литья алюминиевых сплавов / В. Б. Деев, И. Ф. Селянин, К. В. Пономарева, В. Н. Алхимов, О. В. Бинас // Вестник горнометаллургической секции РАЕН: сб. науч. тр. Вып. № 28 – М.: Новокузнецк: СибГИУ, 2012. С. 266–267.
2. Доценко Ю. В. Влияние комплексной технологии на свойства отливок из сплава АК7ч с повышенным содержанием железа / Ю.В. Доценко, В.Ю. Селиверстов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Вып. № 54. – с. 45–48. – Режим доступа: journals.uran.ua/eejet/article/download/2282/2086.
3. Лютова О. В. Повышение литейных свойств вторичных алюминиевых сплавов / О. В. Лютова // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - 2013. - № 3. - С. 53–59. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2013_3_9.
4. Марукович, Е.И. Модифицирование сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко. – Минск : Беларуская навука, 2009. – 192с.
5. Митяев А. А. Комплексное модифицирование вторичных силуминов / А. А. Митяев, И. П. Волчок, Р. А. Фролов, К. Н. Лоза, О. В. Гнатенко, В. В. Лукинов // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - 2014. - № 6. - С. 87–96. - Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2014_6_11.
6. Митяев О.А. Науково-технологічні основи формування структури, фізико-механічних і службових властивостей вторинних силумінів: автореф. дис. на здобуття ступеня доктора техн. наук: спец. 05.02.01 / О.А. Митяев. – Запоріжжя. – 2008. – 34 с. – Режим доступа: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua>.
7. Немененок Б.М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов. – Мн.: Технопринт, 1999. – 1072с.
8. Никитин В.И. Наследственность в литых сплавах / В.И. Никитин, К.В. Никитин. – Москва: Машиностроение-1, 2005. – 510 с.
9. Пат. 46094 Україна, МПК (2009) C22C1/00. Модифікувальний комплекс для алюмінієвих сплавів / Лоза К. М., Митяєв О. А., Волчок І. П. (Україна); заявник та патентовласник Запорізький національний технічний університет. – № u200905914; заявл. 09.06.2009; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23. – 4 с.
10. Петров С.С. Модифицирование заэвтектических силуминов обработкой расплава импульсным электрическим током / С. С. Петров, А. Г. Пригунова, С. В. Пригунов, Д. Н. Ключник // Металлофиз. новейшие технол. / Metallofiz. Noveishie Tekhnol. – 2015, т. 37, № 3 – с. 367–378. – Режим доступа: <http://mfint.imp.kiev.ua/article/v37/i03/MFiNT.37.0367.pdf>.
11. Correlation vs. Causation: The Effects of Ultrasonic Melt Treatment on Cast Metal Grain Size / J. B. Ferguson, Benjamin F. Schultz, Kyu Cho, Pradeep K. Rohatgi // Metals – 2014. – №4 – p. 477–489. – Режим доступа: www.mdpi.com/2075-4701/4/4/477.
12. Influence of Ti, B, and Sr on Microstructure, Mechanical and Tribological Properties of as Cast, Cast Aged, and Forge Aged A356 Alloy – A Comparative Study / R. V. Kurahatti, D. G. Mallapur, K. Rajendra Udupa // World academy of science, engineering and technology international journal of chemical, molecular, nuclear, materials and metallurgical engineering – 2013. – Vol.7, №6 – p. 334-339. . – Режим доступа: scholar.waset.org/1999.2/1753.
13. Recycling of aluminum swarf by direct incorporation in aluminum melts / H. Puga, J. Barbosa, D. Soares, F. Silva, S. Ribeiro // Journal of materials processing technology. – 2009. – Vol. 209. – p. 5195–5203.

REFERENCES

1. Deev V.B., Selyanin I.F., Ponomareva K.V., Alhimov V.N. and Binas O.V. *Modifitsiruyuschiy effekt fizicheskikh vozdeystviy na rasplavyi v resursosberegayuschih tehnologiyah litya alyuminievyih splavov* [The modifying effect of physical influences on the melt in the resource-saving technologies of cast aluminum alloy]. *Vestnik gornometallurgicheskoy sekti RAEN: sbornik nauchnykh trudov* [Journal of mining metallurgical section of natural sciences: proceedings]. SibSIU, Novokuznetsk, 2012, no. 28, pp. 266–267. (in Russian).
2. Dotsenko Yu.V. and Seliverstov V.Yu. *Vliyanie kompleksnoy tehnologii na svoystva otlivok iz splava AK7ch s povyshennyim soderzhaniem zheleza* [Influence of complex technology on the properties of castings Alloy AK7ch with increased iron content].

- with a high iron content]. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovyih tekhnologiy* [Eastern-European journal of enterprise technologies]. 2011, no. 54, pp. 45–48. Available at: journals.urau.ru/eejet/article/download/2282/2086. (in Russian).
3. Lyutova O.V. *Povyshenie liteynykh svoystv vtorichnykh alyuminiyevykh splavov* [Increasing of founding properties of secondary aluminium alloys]. *Nauka ta progres transportu. Visnik DnIpropetrovskogo natsionalnogo unversitetu zallzничного transportu Imeni akademika V. Lazaryana*. [Science and transport progres. Bulletin of dniproperetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryn]. 2013, no. 3. pp. 53–59. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2013_3_9. (in Russian).
 4. Marukovich E.I. *Modifitsirovanie splavov* [Modifying alloys]. Minsk: Belaruskaya navuka, 2009, 192p. (in Russian).
 5. Mityaev A.A., Volchok I. P., Frolov R.A., Loza K.N., Gnatenko O.V. and Lukinov V.V. *Kompleksnoe modifitsirovanie vtorichnykh siluminov* [Complex modification of secondary silumins]. *Nauka ta progres transportu. Visnik DnIpropetrovskogo natsionalnogo unversitetu zallzничного transportu Imeni akademika V. Lazaryana*. [Science and transport progres. Bulletin of dniproperetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryn]. 2014, no. 6. pp. 87–96. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2014_6_11. (in Russian).
 6. Mityaev A.A. *Naukovo-tekhnologichni osnovy formuvannia struktury, fizyko-mekhanichnykh i sluzhbovykh vlastyivostey vtorynnykh siluminiv: 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]. Zaporizhzhya, 2008, 34p. Available at: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua>. (in Ukrainian).
 7. Nemenenok B.M. *Teoriya i praktika kompleksnogo modifitsirovaniya siluminov* [Theory and practice of complex modification silumin]. Mn.: Tehnoprint, 1999, 1072p. (in Russian).
 8. Nikitin V.I. and Nikitin K.V. *Nasledstvennost v lityih splavah* [Hereditiy in cast alloys]. Moskva: Mashinostroenie-1, 2005, 510 p. (in Russian).
 9. Loza K.M., Mityayev O.A., Volchok I.P. *Modyfikovalnyi kompleks dlia aliuminiyevykh splaviv* [Modifying complex for aluminium alloys] Patent UA, no. u200905914, 2009. (in Russian).
 10. Petrov S.S., Prigunova A.G., Prigunov S.V. and Klyuchnik D.N. *Modifitsirovanie zaevtekticheskikh siluminov obrabotkoy rasplava impulsnyim elektricheskim tokom* [Modification of hypereutectic silumin with melt treatment pulsed electric current]. *Metallofiz. noveyshie tehnol* [Metallofiz. new technol]. 2015, Vol. 37, no. 3, pp. 367–378. Available at: <http://mfint.imp.kiev.ua/article/v37/i03/MFiNT.37.0367.pdf>. (in Russian).
 11. Ferguson J.B., Benjamin F. Schultz, Kyu Cho and Pradeep K. Rohatgi *Correlation vs. causation: the effects of ultrasonic melt treatment on cast metal grain size*. *Metals*, 2014, no. 4, pp. 477–489. Available at: www.mdpi.com/2075-4701/4/4/477.
 12. Kurahatti R.V., Mallapur D.G. and Rajendra Udupa K. *Influence of Ti, B, and Sr on microstructure, mechanical and tribological properties of as cast, cast aged, and forge aged A356 alloy – a comparative study*. *World academy of science, engineering and technology international journal of chemical, molecular, nuclear, materials and metallurgical engineering*, 2013, Vol.7, no. 6, pp. 334-339. Available at: scholar.waset.org/1999.2/1753.
 13. Puga. H., Barbosa J., Soares D., Silva F. and Ribeiro S. *Recycling of aluminum swarf by direct incorporation in aluminum melts*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, pp. 5195-5203.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Г.И. Слынько (Украина), д.т.н. проф. А.В. Овчинниковым (Украина).