

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669.714:669.716

А. А. МИТЯЕВ^{1*}, И. П. ВОЛЧОК², Р. А. ФРОЛОВ³, К. Н. ЛОЗА⁴, О. В. ГНАТЕНКО⁵,
В. В. ЛУКИНОВ⁶

^{1*}Каф. «Технология металлов», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (061) 769 82 71, эл. почта tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0001-9034-1359

²Каф. «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

³Каф. «Детали машин и подъемно-транспортные механизмы», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (061) 764 12 73, эл. почта tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0001-9967-0220

⁴АО «Мотор Сич», ул. Моторостроителей, 15, Запорожье, Украина, 69068 тел. +38 (061) 720 48 83, эл. почта tmzntu@gmail.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

КОМПЛЕКСНОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ СИЛУМИНОВ

Цель. В работе необходимо разработать научно-технологические основы формирования заданной структуры вторичных доэвтектических (АК8МЗ) и эвтектических (АК12М2МгН) силуминов и повышения показателей их механических и служебных свойств в литом состоянии и после термообработки до уровня первичных сплавов. **Методика.** Определение химического состава проводили спектральным анализом на искровом спектрометре «СПЕКТРОЛАБ» (Германия). Металлографический анализ выполняли на микроскопах МИМ-7 и МИМ-8, а также методом металлографии высокого разрешения на растровом электронном микроскопе «JSMT-300» (Япония). Термообработку алюминиевых сплавов проводили по режимам Т1 и Т5 в соответствии с ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93). При определении механических свойств использовали стандартные методики. Для поршневого сплава АК12М2МгН (АЛ25) температурный коэффициент линейного расширения определяли с помощью оптического кварцевого dilatометра Шевенара на образцах Ø 3,5 мм длиной 50 мм. Сопровождение высокотемпературному разрушению определяли по ГОСТ 10145-81, как время до разрушения образца при заданном напряжении 50 МПа и температуре 300 °С. **Результаты.** Разработана и внедрена в производство технология получения сплавов из шихты, состоящей на 100 % из лома и отходов производства, которая обеспечивает получение металла гарантированного химического состава и высокого качества при снижении энергозатрат на плавку. **Научная новизна.** Установлены закономерности формирования структурно-фазового состояния и уровня физико-механических свойств вторичных доэвтектических и эвтектических силуминов в зависимости от процессов рафинирования и модифицирования. Проведено обобщение закономерностей разрушения вторичных силуминов и получены количественные характеристики роли интерметаллидных фаз в механизмах разрушения и формировании уровня механических свойств алюминиевых сплавов. **Практическая значимость.** Изучены процессы структурообразования вторичных алюминиевых сплавов в зависимости от технологии их получения. Разработаны высокоэффективные рафинирующе-модифицирующие комплексы для обработки вторичных доэвтектических и эвтектических алюминиевых сплавов и определено оптимальное количество модификаторов в зависимости от качества шихты.

Ключевые слова: силумины; интерметаллидные фазы; структура; параметр формы; механические свойства; рафинирующе-модифицирующая обработка

Введение

Известно, что модифицированием называется процесс воздействия на кристаллизацию и структуру сплава путем введения специальных добавок – модификаторов. П. А. Ребиндер все модифицирующие добавки по физико-химической природе их воздействия на процесс образования кристаллических зародышей разделил на модификаторы I и II рода. Модификаторы I рода образуют в расплаве высокодисперсные твердые частички, которые формируют центры кристаллизации. Модификаторы II рода – растворимые вещества, избирательно адсорбирующиеся на гранях кристаллического зародыша, изменяющие межфазное поверхностное натяжение и характер роста кристаллов [2].

При производстве и литье алюминиевых сплавов широко применяется модифицирование. Модифицирующие добавки вводят в виде лигатуры в шихту или непосредственно в расплав. К числу модификаторов I рода алюминиевых сплавов следует отнести титан и ванадий, образующие тугоплавкие интерметаллиды $TiAl_3$ и VAI_6 , а также ультрадисперсные частицы оксидов, карбидов, боридов и других неметаллических включений. Модификаторами II рода являются поверхностно-активные вещества, положительно влияющие на структуру алюминиевых сплавов, большинство из которых являются элементами I группы (Li, Na, K, Rb, Cs), а также сера и фосфор. В то же время многочисленными проведенными исследованиями показана высокая эффективность комплексных модификаторов. В связи с этим работа посвящена изучению комплексного модифицирования доэвтектических и эвтектических вторичных силуминов.

Цель

Основная цель работы заключалась в разработке научно-технологических основ структурообразования вторичных силуминов для повышения показателей их механических и служебных свойств в литом и термообработанном состояниях до уровня первичных сплавов.

Методика

В работе исследовались доэвтектические АК8МЗ и эвтектические АК12М2МгН (АЛ25) сплавы, химический состав которых соответствовал требованиям ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93).

Контроль химического состава проводился непрерывно на всех стадиях технологического процесса получения алюминиевых сплавов. Определение химического состава осуществляли спектральным анализом на искровом спектрометре «SPECTROLAB» (Германия) по 22 химическим элементам с точностью $\pm 0,0001$ масс. %. Металлографический анализ структуры выполняли на микроскопах МИМ-7 и МИМ-8 при увеличении 100...400 раз, а также методом металлографии высокого разрешения на растровом электронном микроскопе «JSMT-300» (Япония) при ускоряющем напряжении 20...25 кВ и диаметре электронного зонда до $1 \cdot 10^{-9}$ м. Микроструктура сплавов изучалась на шлифах без травления, а также после травления реактивом состава: 12,5 мл HF, 25 мл HNO_3 , 50 мл HCl, 12,5 мл H_2O .

Прочность и пластичность сплавов определяли на образцах диаметром 10 мм и рабочей длиной 50 мм, изготовленных в соответствии с ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93). Метод отбора образцов и порядок проведения испытаний на твердость регламентировался требованиями ГОСТ 9013-69. Термообработку алюминиевых сплавов проводили по режимам T1 и T5 в соответствии с ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93).

Для поршневого сплава АК12М2МгН (АЛ25) температурный коэффициент линейного расширения определяли с помощью оптического кварцевого dilatометра Шевенара на образцах $\varnothing 3,5$ мм длиной 50 мм. Сопrotивление высокотемпературному разрушению определяли по ГОСТ 10145-81, как время до разрушения образца при заданном напряжении 50 МПа и температуре 300°C.

Результаты

Основным ограничительным фактором широкого использования вторичных сплавов является их более низкое качество в сравнении с первичными. Процесс переработки отходов производства и содержащего алюминий лома позволяет сберечь огромное количество энергии и первичного сырья. Так, при получении 1 т вторичного алюминия сохраняется 4 т бокситов, 700 кг кокса и снижаются вредные выбросы (в том числе CO) на 35 кг [5]. По данным [1], в результате использования 1 тонны высококачественных вторичных алюминиевых сплавов при изготовлении отливок взамен первич-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ного алюминия, в народном хозяйстве экономится в зависимости от марки сплава и области его применения от 230 до 490 кг первичного алюминия, от 24 до 197 кг кристаллического кремния, от 1,1 до 4,6 т бокситов, от 0,4 до 1,8 т глинозема, а также от 4 до 16 тысяч кВт·ч электроэнергии и от 40 до 340 кг условного топлива. Количество отходящих газов при этом сокращается более чем на 15 тысяч м³ в расчете на каждую тонну вторичного силумина.

Проблема повышения качества алюминиевых сплавов актуальна для всех развитых стран [9, 17–18, 20–21].

Авторами с целью улучшения структуры, повышения механических и служебных свойств, снижения пористости, на основании лаборатор-

ных и опытно-промышленных исследований в качестве базового для доэвтектических силуминов был предложен модификатор [12], содержащий элементы, выполняющие роль модификаторов I и II рода. В состав модификатора вошли сера, карбонат натрия, ультрадисперсный карбид кремния и электролитический титан. Соотношение компонентов и описание влияния каждого из них на расплав подробно изложены в работах [3, 4, 10, 12, 16, 19].

Промышленные плавки показали, что обработка расплавов модификатором [12] сопровождалась активным барботажем жидкого металла, образованием на поверхности сухого легко удаляемого шлака.


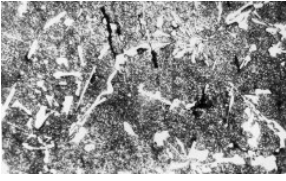

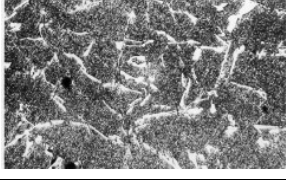

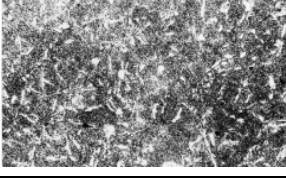
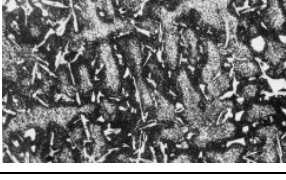
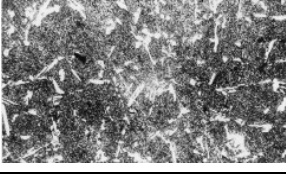

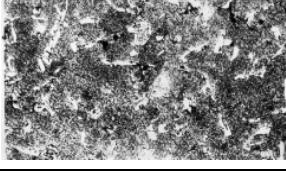
Количество модификатора [12], масс. %	Состояние сплава	
	Литое	После термообработки T5
0		
0,025		
0,05		
0,075		
0,1		

Рис. 1. Структура вторичного сплава АК8МЗ (× 200)

Fig. 1. Structure of the secondary alloy AK8M3 (× 200)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Длительность процесса обработки зависела от объемов жидкого металла и составляла 7...12 минут. В ходе обработки отмечено активное изменение структуры, которое сопровождалось уменьшением размеров полей выделений α -твердого раствора кремния в алюминии и дроблением комплексных интерметаллидных фаз, снижением их среднего параметра формы $\lambda_{\text{ср}}$ (отношение максимальной длины включений к их ширине) при одновременном повышении равномерности распределения (рис. 1).

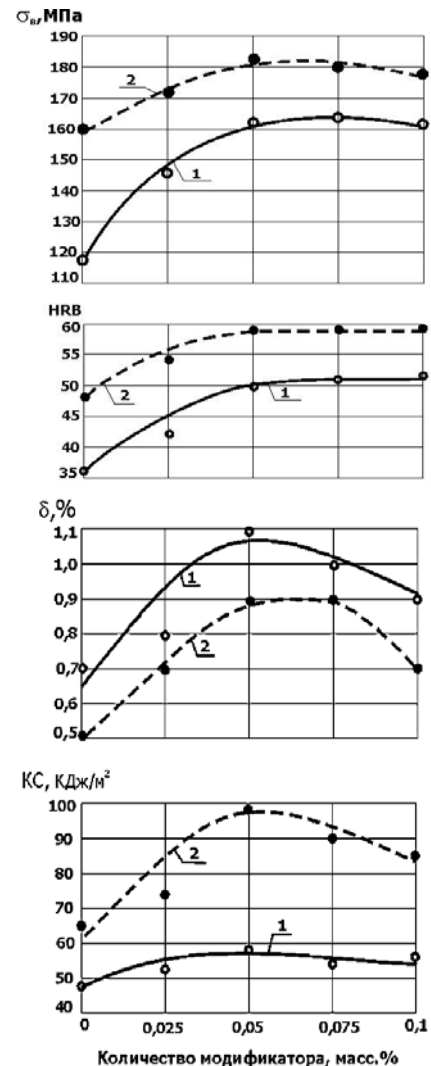
На примере вторичного сплава АК8МЗ установлены зависимости влияния количества модификатора [12] на свойства и параметр формы включений в литом состоянии и после термической обработки по режиму T5 (рис. 2). Полученные данные позволили оптимизировать количество модификатора [12] на уровне 0,05...0,075 % от массы жидкого металла. Также результаты работы наглядно продемонстрировали важную роль параметра формы включений λ в обеспечении заданного уровня свойств вторичных силуминов (рис. 3). Результаты исследований взятого за основу модифицирующего комплекса [12] позволили в дальнейшем разработать целый ряд высокоэффективных рафинирующе-модифицирующих комплексов для обработки алюминиевых сплавов, полученных из низкосортного сырья [3, 11, 13, 14, 15, 16].

Малая плотность алюминиевых сплавов, высокие технологичность, пластичность и усталостная прочность; до 30 % меньший, по сравнению с чугуном, коэффициент передачи от газа, а также высокая теплопроводность на уровне 125...146 Вт/м·К сделали их основными поршневыми материалами современности [7].

В настоящее время наиболее широкое применение для изготовления поршней как у нас, так и за рубежом получили литейные сплавы системы алюминий-кремний эвтектического и заэвтектического состава.

Эвтектические поршневые сплавы имеют высокую жидкотекучесть и в 2 раза более низкую склонность к образованию горячих трещин, чем доэвтектические алюминиевые сплавы. За счет их меньшего температурного коэффициента линейного расширения возможно снижение максимального зазора между гильзой цилиндра и поршнем на 25 %, что обеспечивает снижение вибраций и практически полностью устраняет кавитационное разрушение гильз.

a - a



b - b

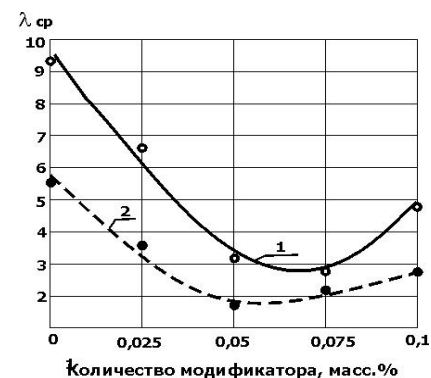


Рис. 2. Влияние модификатора на механические свойства (a) и параметр формы включений λ (b) вторичного сплава АК8МЗ:

1 – литое состояние, 2 – после термообработки T5

Fig. 2. Modifier's influence on the mechanical properties (a) and shape parameter λ (b) of the secondary alloy АК8МЗ:

1 – cast state, 2 – after heat treatment T5

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

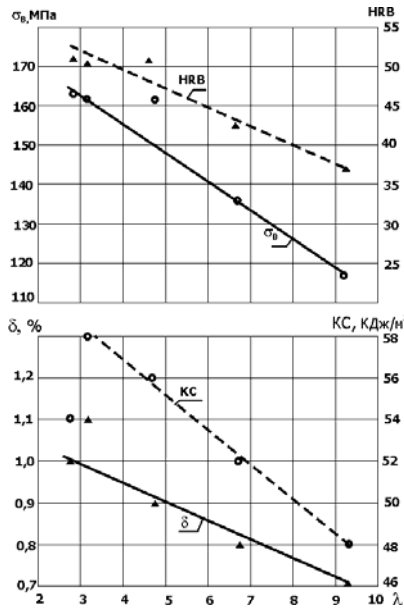
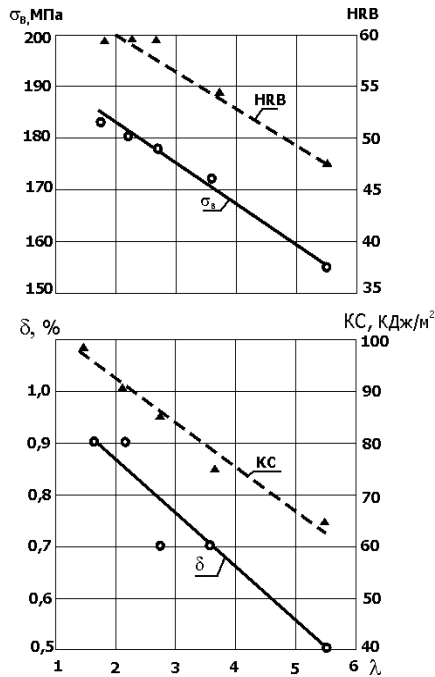
a – a*b – b*

Рис. 3. Влияние параметра формы включений λ на механические свойства вторичного сплава АК8МЗ: *a* – литое состояние, *b* – после термообработки Т5

Fig. 3. Shape parameter's λ influence on the mechanical properties of the secondary alloy АК8МЗ: *a* – cast state, *b* – after heat treatment Т5

Малая плотность эвтектических сплавов позволяет уменьшить массу поршня и уровень инерционных нагрузок на кривошипно-шатунный механизм на 6...8 % [8].

Подходы, разработанные авторами в отношении доэвтектических силуминов, были пере-

несены на эвтектический вторичный поршневой сплав АЛ25 (АК12М2МгН). Целью работы было получение стабильной структуры и повышение показателей длительной прочности при высоких температурах, а также снижение температурного коэффициента линейного расширения. Для достижения поставленной цели был разработан модифицирующий комплекс [14]. Использование данного комплекса обеспечило измельчение макроструктуры поршней (рис. 4), а также получение заданной микроструктуры каркасного типа, которая надежно блокировала границы измельченных зерен α -твердого раствора кремния в алюминии, тем самым эффективно препятствуя диффузионным процессам и движению дислокаций (рис. 5).

Механические свойства вторичных сплавов, обработанных модифицирующим комплексом [14] соответствовали требованиям ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93).

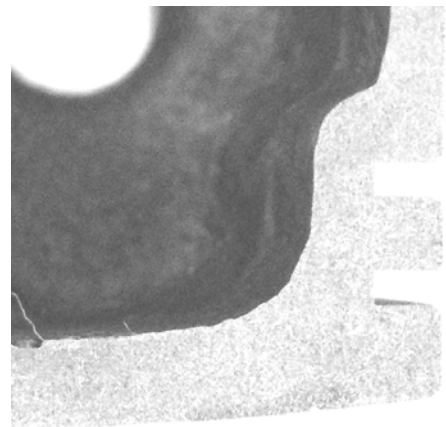
a – a*b – b*

Рис. 4. Макроструктура поршней ($\times 5$): *a* – серийная технология изготовления; *b* – экспериментальная

Fig. 4. Macrostructure of pistons ($\times 5$): *a* – serial technology of production; *b* – experimental

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

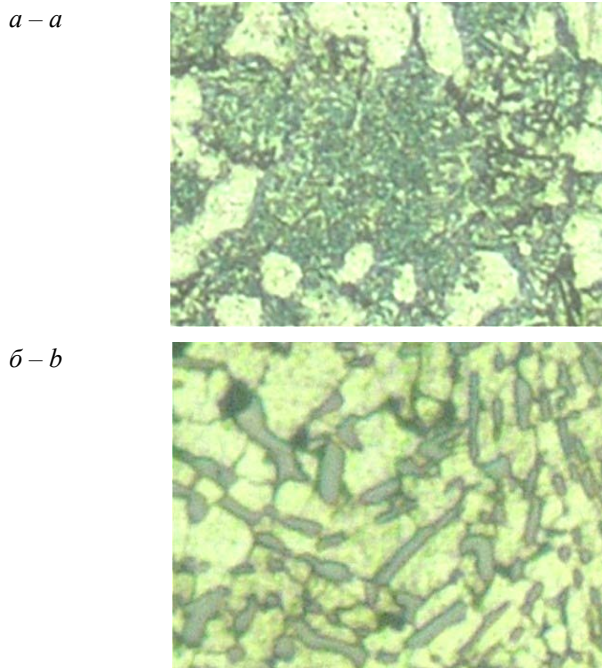


Рис. 5. Микроструктура сплава АЛ25 ($\times 950$):
a – серийная технология изготовления;
б – экспериментальная

Fig. 5. Microstructure of the alloy AL25 ($\times 950$):
a – serial technology of production; *b* – experimental

Важнейшим эксплуатационным свойством, определяющим ресурс работы изделий из поршневых сплавов, является жаропрочность. Одним из основных показателей жаропрочности является длительная прочность, испытания по определению которой регламентируются ГОСТ 10145-81 [6] посредством определения времени до разрушения образцов при температуре испытаний $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и заданном напряжении 50 МПа . Сравнение результатов показало, что по характеристикам длительной прочности сплавы, обработанные модифицирующим комплексом [14], в 2,4 раза превосходили показатель сплавов, полученных по традиционной технологии. Установлено, что оптимальным количеством модифицирующего комплекса [14] является присадка $0,15\dots 0,20$ масс. %, которая в диапазоне рабочих температур обеспечивала снижение температурного коэффициента линейного расширения на $5,60\dots 5,75\%$.

Научная новизна и практическая значимость

Установлены закономерности формирования структурно-фазового состояния и уровня физи-

ко-механических свойств вторичных доэвтектических и эвтектических силуминов в зависимости от процессов рафинирования и модифицирования. Проведено обобщение закономерностей разрушения вторичных силуминов и получены количественные характеристики роли интерметаллидных фаз в механизмах разрушения и формировании уровня механических свойств алюминиевых сплавов.

Анализ процессов структурообразования и формирования уровня физико-механических свойств доэвтектических и эвтектических вторичных силуминов способствовал разработке комплексных рафинирующе-модифицирующих комплексов, а также технологии их использования, обеспечивающей повышение свойств вторичных сплавов до уровня первичных. Проведенная работа позволила определить оптимальное количество рафинирующе-модифицирующих комплексов в зависимости от качества шихты. Высокая эффективность предложенных технологических решений доказана промышленным внедрением.

Выводы

Показано, что повышение качества силуминов, полученных из 100% вторичного сырья, до уровня первичных, возможно за счет использования экспериментальных рафинирующе-модифицирующих комплексов. Разработанные комплексы имеют малую стоимость, не усложняют технологию получения сплавов, уменьшают количество вредных выбросов в окружающую среду и улучшают санитарно-гигиенические нормы в литейных цехах, сокращают потребность в универсальных рафинирующе-модифицирующих препаратах в $10\dots 15$ раз.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 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. Всерос. конф. – Пенза, 1991. – С. 52–54.
2. Воздвиженский, В. М. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении / В. М. Воздвиженский, В. А. Грачев, В. В. Спасский. – Москва : Машиностроение, 1984. – 432 с.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

3. Волчок, И. П. Повышение качества рециркулируемых алюминиевых сплавов / И. П. Волчок, А. А. Митяев // Вісн. двигунобудування. – 2004. – № 3. – С. 103–107.
4. Волчок, І. П. Рафінуюче-модифікуючий комплекс для обробки алюмінієвих сплавів / І. П. Волчок, О. А. Мітяєв, С. Г. Рязанов // Неметалеві вкраплення і газу у ливарних сплавах : зб. наук. пр. X Міжнар. науково-техн. конф. (12.05-16.05.2003) / ЗНТУ. – Запоріжжя : 2003. – С. 220.
5. Гавриленко, Б. Б. Економіко-правові важелі раціонального природокористування / Б. Б. Гавриленко. – Запоріжжя : Поліграф, 2004. – 144 с.
6. ГОСТ 10145-81. Металлы. Метод испытания на длительную прочность. – Введ. 1982-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1981. – 12 с.
7. Зильберг, Ю. Я. Алюминиевые сплавы в тракторостроении / Ю. Я. Зильберг, К. М. Хрущова, Г. Б. Гершман. – Москва : Машиностроение, 1971. – 151 с.
8. Лоза, К. Н. Влияние модифицирования и термической обработки на формирование структуры и свойств вторичного поршневого сплава АЛ25 : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / Лоза Константин Николаевич ; Запорожский национальный технический университет. – Запорожье, 2012. – 140 с. – Библиогр.: с. 108–122.
9. Лютова, О. В. Повышение литейных свойств вторичных алюминиевых сплавов / О. В. Лютова // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2013. – № 3 (45). – С. 53–59.
10. Митяев, А. А. Комплексная рафинирующе-модифицирующая обработка алюминиевых сплавов / А. А. Митяев // Стр-во, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2008. – Вып. 45 (ч. 2). – С. 138–142.
11. Митяев, А. А. Повышение качества переплава загрязненной алюминиевой стружки / А. А. Митяев // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вып. 22. – С. 175–180.
12. Пат. 57584А Україна, МКВ С22С 1/06. Модифікатор для алюмінієвих сплавів / Волчок І. П., Мітяєв О. А. (Україна) ; заявник та патентовласник Запорізький Запорізький нац. техн. ун-т. – № 2002108343 ; заявл. 22.10.2002 ; опубл. 16.06.2003, Бюл. № 6. – 4 с.
13. Пат. 42653 Україна, МПК (2009) С22С 1/100. Модифікатор алюмінієвих сплавів / Волчок І. П., Мітяєв О. А., Островська А. Є., Скуйбіда О. Л. (Україна) ; заявник та патентовласник Запорізький Запорізький нац. техн. ун-т. – № u200902454 ; заявл. 19.03.2009 ; опубл. 10.07.2009, Бюл. № 13. – 4 с.
14. Пат. 46094 Україна, МПК (2009) С22С 1/00. Модифікувальний комплекс для алюмінієвих сплавів / Лоза К. М., Мітяєв О. А., Волчок І. П. (Україна) ; заявник та патентовласник Запорізький Запорізький нац. техн. ун-т. – № u200905914 ; заявл. 09.06.2009 ; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23. – 4 с.
15. Пат. 69720 Україна, МПК С22С 1/06 (2006.1). Рафінуючально-модифікувальний комплекс для алюмінієвих сплавів / Широкобокова Н. В., Мітяєв О. А., Волчок І. П., Кюрчев С. В., Колодій О. С. (Україна); заявник та патентовласник Запорізький нац. техн. ун-т. – № u201112705; заявл. 31.10.2011 ; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9. – 4 с.
16. Belikov, S. The nanomodifier of aluminium alloys / S. Belikov, I. Volchok, O. Mityayev // AFES. Davos Forum. – Davos, Switzerland, 2006. – P. 191–193.
17. Electric pulse treatment of welded joint of aluminum alloy / I. A. Vakulenko, Y. L. Nadezhdin, V. A. Sokirko, I. P. [et. al.] // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. – 2013. – № 4 (46). – С. 73–82.
18. Kontrola produkcji wysokojakosciowych stopow odlewniczych metoda ATD / S. Pietrowski, G. Gumieny, B. Pisarek, R. Wladysiak // Archiwum technologii maszyn i automatyzacji. – Poznan, 2004. – Vol. 24, № 3. – P. 131–144.
19. Lipinski, T. Improvement of mechanical properties of AlSi₇Mg alloy with fast cooling homogeneous modifier / T. Lipinski // Archives of foundry engineering. – Katowice ; Gliwice, 2008. – Vol. 8. – Iss. 1 – P. 85–88.
20. Mityayev, A. Improvement of quality of secondary aluminium alloys in conditions of mass production / A. Mityayev, S. Belikov // Archives of metallurgy and materials. – Warszawa : Krakow, 2007. – Vol. 52, № 3. – P. 521–524.
21. The structure and properties of sheets made from aluminium and aluminium alloys for use in transport industry / A. Klyszewski, M. Lech-Grega, W. Szymanski, J. Zelechowski // Aluminium in transport : proc. of IX Intern. Conf. (22.10-25.10.2003) / Institute of Non-ferrous metals. – Cracow ; Tomaszowice, 2003. – P. 203–217.

О. А. МІТЯЄВ^{1*}, І. П. ВОЛЧОК², Р. О. ФРОЛОВ³, К. М. ЛОЗА⁴, О. В. ГНАТЕНКО⁵,
В. В. ЛУКІНОВ⁶

^{1*}Каф. «Технологія металів», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (061) 769 82 71, ел. пошта tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0001-9034-1359

²Каф. «Технологія металів», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (061) 769 83 51, ел. пошта tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0003-1580-0556

³Каф. «Деталі машин і підйомно-транспортні механізми», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (061) 769 82 73, ел. пошта tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0001-9967-0220

⁴АТ «Мотор Січ», вул. Моторобудівників, 15, Запоріжжя, Україна, 69068, тел. +38 (061) 720 48 83, ел. пошта tmzntu@gmail.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

КОМПЛЕКСНЕ МОДИФІКУВАННЯ ВТОРИННИХ СИЛУМІНІВ

Мета. В роботі необхідно розробити науково-технологічні основи формування заданої структури вторинних доєвтектичних (АК8МЗ) та евтектичних (АК12М2МгН) силумінів та підвищення показників їх механічних і службових властивостей у литому стані та після термообробки до рівня первинних сплавів.

Методика. Визначення хімічного складу проводили спектральним аналізом на іскровому спектрометрі «SPECTROLAB» (Німеччина). Металографічний аналіз виконували на мікроскопах МІМ-7 та МІМ-8, а також методом металографії високої роздільної здатності на растровому електронному мікроскопі «JSMТ-300» (Японія). Термообробку алюмінієвих сплавів проводили за режимами Т1 і Т5 згідно ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93). При визначенні механічних властивостей використовували стандартні методики. Для поршневого сплаву АК12М2МгН (АЛ25) температурний коефіцієнт лінійного розширення визначали за допомогою оптичного кварцового дилатометра Шевенара на зразках Ø 3,5 мм довжиною 50 мм. Опір високотемпературному руйнуванню визначали згідно ГОСТ 10145-81, як час до руйнування зразка при заданому напруженні 50 МПа та температурі 300°C.

Результати. Розроблено та впроваджено у виробництво технологію отримання сплавів із шихти, що складається на 100 % з лому та відходів виробництва, яка забезпечує отримання металу гарантованого хімічного складу та високої якості при зниженні енерговитрат на плавку. **Наукова новизна.** Встановлено закономірності формування структурно-фазового стану та рівня фізико-механічних властивостей вторинних доєвтектичних та евтектичних силумінів в залежності від процесів рафінування та модифікування. Проведено узагальнення закономірностей руйнування вторинних силумінів та отримано кількісні характеристики ролі інтерметалідних фаз у механізмах руйнування та формуванні рівня механічних властивостей алюмінієвих сплавів. **Практична значимість.** Вивчено процеси структуроутворення вторинних алюмінієвих сплавів в залежності від технології їх отримання. Розроблено високоефективні рафінувально-модифікувальні комплекси для обробки вторинних доєвтектичних та евтектичних алюмінієвих сплавів та визначено оптимальну кількість модифікаторів в залежності від якості шихти.

Ключові слова: силуміни; інтерметалідні фази; структура; параметр форми; механічні властивості; рафінувально-модифікувальна обробка

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

A. A. MITYAYEV^{1*}, I. P. VOLCHOK², R. A. FROLOV³, K. N. LOZA⁴, O. V. HNATENKO⁵, V. V. LUKINOV⁶

^{1*}Dep. «Metal Technology», 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

²Dep. «Metal Technology», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (061) 769 83 51, e-mail tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0003-1580-0556

³Dep. «Machine Parts and Lifting and Transport Mechanisms», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (061) 769 82 73, 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

COMPLEX MODIFICATION OF SECONDARY SILUMINS

Purpose. Development of scientific and technological bases of formation of the specified secondary hypoeutectic (AK8M3) and eutectic (AK12M2MgH) silumins' structure; and increasing their mechanical and service properties' indices in the cast state and after heat treatment up to the level of primary alloys. **Methodology.** Determination of the chemical composition was conducted by spectral analysis on the spark spectrometer «SPECTROLAB» (Germany). Metallographic analysis was performed on the microscopes MIM-7 and MIM-8, and also by the high definition metallography method using the raster electronic microscope «JSMT-300» (Japan). Heat treatment of aluminum alloys was carried out applying T1 and T5 modes according to State Standard of Ukraine 2839-94 (GOST 1583-93). Standard techniques were used during the determination of mechanical properties. The temperature coefficient of linear expansion for the piston alloy AK12M2MgH (AL25) was determined using the specimens Ø with the diameter of 3.5 mm and length of 50 mm with the use of Shevenard optical quartz dilatometer. High temperature fracture resistance was determined according to State Standard 10145-81 as the time before fracture of the specimen at specified stress of 50 MPa and temperature of 300°C. **Findings.** The technology of obtaining alloys from charge, which consists of 100 % scrap and production wastes has been developed and implemented into production. This technology provides obtaining of metal of the guaranteed chemical composition and high quality with the reduction of energy costs for melting. **Originality.** The regularities of the formation of the structural and phase state and the level of physical and mechanical properties of eutectic and secondary hypoeutectic silumins depending on the refining and modifying processes have been established. The generalization of regularities of the secondary silumins' fracture has been carried out. Quantitative characteristics of the intermetallic phases' role in the fracture mechanisms and aluminum alloys' mechanical properties level formation have been obtained. **Practical value.** Structure formation processes of secondary aluminium alloys depending on their production technology have been studied. Highly efficient refining and modifying complexes for treatment of secondary hypoeutectic and eutectic aluminum alloys have been developed and the optimal quantity of modifiers depending on the charge quality has been determined.

Keywords: silumins; intermetallic phases; structure; shape parameter; mechanical properties; refining and modifying treatment

REFERENCES

1. Aleksakhin A.V., Khmel'nitskaya N.V., Sivayeva Ye.K. Effektivnost ispolzovaniya vtorichnykh alyuminiyevykh splavov v liteynom proizvodstve [Efficiency of using the secondary aluminium alloys in foundry production]. *Tezisy dokladov Vserossiyskoy konferentsii «Ekonomicheskiye problemy liteynogo proizvodstva Rossii»* [Proc. of the All-Russian Conf. "Economic problems of foundry production in Russia"]. Penza, 1991, pp. 52-54.
2. Vozdvizhenskiy V.M., Grachev V.A., Spasskiy V.V. *Liteynyye splavy i tekhnologiya ikh plavki v mashinostroyenii* [Foundry alloys and technology of their melting in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1984. 432 p.
3. Volchok I.P., Mityayev A.A. Povysheniye kachestva retsirkuliruyemykh alyuminiyevykh splavov [Increasing of the quality of the recycled aluminium alloys]. *Visnyk dvyhunobuduvannia* [Bulletin of aeroenginebuilding], 2004, issue 3, pp. 103-107.
4. Volchok I.P., Mitiaiev O.A., Riazanov S.H. Rafinuiuche-modyfikuiuchy kompleks dlia obrobky alyuminiyevykh splaviv [Refining and modifying complex for treatment of aluminium alloys]. *Zbirnyk naukovykh prats X Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii Zaporizhzhia «Nemetalevi vkraplennia*

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- i hazy u lyvarnykh splavakh»* [Proc. of the 10th Int. Scientific and Technical Conf. of Zaporizhzhia «Non-metallic inclusions and gases in foundry alloys»]. Zaporizhzhia, 2003, p. 220.
5. Havrylenko B.B. *Ekonomiko-pravovi vazheli ratsionalnoho pryrodokorystuvannya* [Economical and law instruments of rational use of nature]. Zaporizhzhya, Polihraf Publ., 2004. 144 p.
 6. *GOST 10145-81. Metally. Metod ispytaniya na dlitelnyuyu prochnost.* [State Standard 10145-81. Metals. The method of testing of long-term strength]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1981. 12 p.
 7. Zilberg Yu.Ya., Khrushchova K.M., Gershman G.B. *Alyuminiyevyye splavy v traktorostroyenii* [Aluminium alloys in tractor building]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1971. 151 p.
 8. Loza K.N. *Vliyaniye modifitsirovaniya i termicheskoy obrabotki na formirovaniye struktury i svoystv vtorichnogo porshneвого splava AL25.* Kand, Diss. [Influence of modification and heat treatment on the formation of structure and properties of the secondary piston alloy AL25. Cand. Diss.]. Zaporozhe, 2012. 140 p.
 9. Lyutova O.V. *Povysheniye litynykh svoystv vtorichnykh alyuminiyevykh splavov* [Increasing of foundry properties of secondary aluminium alloys]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 3 (45), pp. 53-59.
 10. Mityayev A.A. *Kompleksnaya rafiniruyushche-modifitsiruyushchaya obrabotka alyuminiyevykh splavov* [Complex refining and modifying treatment of aluminium alloys]. *Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye* [Construction, material science, machine building], issue 45, part 2, pp. 138-142.
 11. Mityayev A.A. *Povysheniye kachestva pereplava zagryaznennoy alyuminiyevoy struzhki* [Increasing of the remelting quality of the contaminated aluminium chip]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 22, pp. 175-180.
 12. Volchok I.P., Mitiaiev O.A. *Modyfikator dlia alyuminiyevykh splaviv* [Modifier for aluminium alloys]. Patent UA, no. 2002108343, 2003.
 13. Volchok I.P., Mitiaiev O.A., Ostrovska A.Ye., Skuibida O.L. *Modyfikator alyuminiyevykh splaviv* [Modifier of aluminium alloys]. Patent UA, no. u200902454, 2009.
 14. Loza K.M., Mitiaiev O.A., Volchok I.P. *Modyfikovalnyi kompleks dlia alyuminiyevykh splaviv* [Modifying complex for aluminium alloys]. Patent UA, no. u200905914, 2009.
 15. Shyrokobokova N.V., Mitiaiev O.A., Volchok I.P., Kiurchev S.V., Kolodii O.S. *Rafinivalno-modyfikovalnyi kompleks dlia alyuminiyevykh splaviv* [Refining and modifying complex for aluminium alloys]. Patent UA, no. u201112705, 2012.
 16. Belikov S., Volchok I., Mityayev O. *The nanomodifier of aluminium alloys. Aims for future of engineering science.* AFES 2006. Davos. Switzerland, 2006, pp. 191-193.
 17. Vakulenko I.A., Nadezhdin Yu.L., Sokirko V.A., Volchok I.P., Mityayev A.A. *Electric pulse treatment of welded joint of aluminum alloy.* *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 4 (46), pp. 73-82.
 18. Pietrowski S., Gumienny G., Pisarek B., Wladysiak R. *Kontrola produkcji wysokojakosciowych stopow odlewniczych metoda ATD* [Production control of advanced casting alloys with TDA method]. *Archiwum technologii maszyn i automatyzacji*, 2004, vol. 24, issue 3, pp. 131-144.
 19. Lipinski T. *Improvement of mechanical properties of AlSi₇Mg alloy with fast cooling homogeneous modifier.* *Archives of foundry engineering.* Katowice-Gliwice, 2008, vol. 8, issue 1, pp. 85-88.
 20. Mityayev A., Belikov S. *Improvement of quality of secondary aluminium alloys in conditions of mass production.* *Archives of metallurgy and materials.* Warszawa-Krakow, 2007, vol. 52, no. 3, pp. 521-524.
 21. Klyszewski A., Lech-Grega M., Szymanski W., Zelechowski J. *The structure and properties of sheets made from aluminium and aluminium alloys for use in transport industry.* *Proc. of 9th Int. Conf. «Aluminium in transport 2003».* Cracow-Tomaszowice, 2003, pp. 203-217.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., доц. А. В. Овчинниковым (Украина); д.т.н., проф. И. А. Вакуленко (Украина)

Поступила в редколлегию: 20.08.2014

Принята к печати: 23.10.2014