

## УДК 669.715

О. В. ЛЮТОВА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Начертательная геометрия и компьютерная графика», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (061) 769 85 32, эл. почта tmzntu@gmail.com

## ПОВЫШЕНИЕ ЛИТЕЙНЫХ СВОЙСТВ ВТОРИЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**Цель.** Изучить влияние металлургических факторов производства на литейные свойства вторичного алюминиевого сплава АК9М2. **Методика.** Для экспериментальных плавов в качестве независимых переменных были выбраны количество стружки в шихте, содержание железа и величина присадки модификатора. Компоненты модификатора изменялись в интервалах 25...40 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 12...20 % SiC, 3...8 % Ti, остальное – S. Микроструктуру сплавов исследовали под световым микроскопом, с использованием методик количественной металлографии. Анализ влияния конкретных параметров сплавов осуществляли с использованием методов математической статистики. Изучали влияние добавок стружки, количества железа и модификатора на жидкотекучесть и пористость получаемых сплавов. **Результаты.** В работе показано, что увеличение содержания стружки в шихте от 1 до 19 % и количества железа в сплаве от 0,66 до 2,34 %, приводило к снижению жидкотекучести сплава на 30...35 %. Одновременно наблюдалось уменьшение линейной усадки на 18...20 % и прирост пористости от 0,5 до 2,5 балла. Представленные изменения литейных свойств сплава обусловлены количеством интерметаллидных фаз неблагоприятной формы и его способностью к насыщению газами. Увеличение присадки модификатора с 0,02 до 0,15 % приводило к повышению жидкотекучести на 10...15 %, росту линейной усадки на 30...35 % и снижению пористости с 2,5 до 0,5 балла. Одновременно наблюдалось изменение формы интерметаллидных фаз и рост равномерности их распределения. **Научная новизна.** Увеличение концентрации железа в составе силумина сопровождается снижением его жидкотекучести. При этом темп снижения жидкотекучести сплава пропорционален количеству растворенного железа. Характер влияния железа обусловлен образованием высокотемпературных интерметаллидных соединений типа  $\text{Al}_3\text{Fe}$ ,  $\text{Al}_3\text{SiFe}$ , которые повышают вязкость металла. **Практическая значимость.** Использование полученных научных результатов на практике позволило разработать технические решения, направленные на повышение качественных показателей силуминового сплава.

**Ключевые слова:** вторичные алюминиевые сплавы; жидкотекучесть; линейная усадка; пористость; модификатор

### Введение

Благодаря малой плотности, хорошей коррозионной стойкости и достаточно высокой удельной прочности алюминиевые сплавы по объемам применения занимают второе место после стали и чугуна. В железнодорожном транспорте Европы на сегодняшний день 80 % вагонов изготовлены с использованием алюминиевых сплавов [1, 4, 8]. Для снижения массы деталей, уменьшения инерционных сил и вибраций машин, а также затрат на механическую обработку производится замена чугунных деталей (шкив, дисков, рабочих колес и лопаток вентиляторов, различного рода крышек и корпусов механизмов) на алюминиевые.

В связи с постоянным ростом производства изделий из алюминиевых сплавов, накоплением лома и отходов, в современных условиях суще-

ствует проблема их переработки. Одним из перспективных направлений является использование при производстве алюминиевых сплавов указанных отходов в качестве вторичного сырья [10, 11, 13]. Более того, указанная проблема является особенно актуальной для Украины. Имея достаточно развитую отрасль, которая непрерывно требует повышения производства алюминиевых сплавов, в действительности можно полагать, что Украина практически уже утратила собственное производство алюминия. На основании этого, производство вторичного алюминия и его сплавов, в силу меньших энергетических затрат и выбросов в окружающую среду, имеет тенденцию к возрастанию.

С другой стороны, вторичные алюминиевые сплавы имеют более низкие механические и технологические свойства по сравнению

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

с первичними [3, 12]. Литейные свойства, такие как жидкотекучесть и линейная усадка вторичных алюминиевых сплавов, позволяют получить отливки более точных размеров (по сравнению со стальными и чугунами) и со значительно высоким уровнем чистоты поверхности. Достаточно существенное влияние на качество алюминиевых сплавов оказывает их способность насыщаться газами.

**Цель**

Целью работы явилось изучение влияния металлургических факторов, таких как: изменение состава шихтовых материалов, содержания железа в сплаве и количества добавляемого модификатора – на качественные показатели вторичных силуминов.

**Методика**

Для экспериментальных плавов была использована шихта, состоящая из вторичного сплава на основе алюминия АК9М2 и стружки того же сплава. Плавки проводились согласно матрице планирования эксперимента  $2^3$ . В качестве независимых переменных были выбраны количество стружки в шихте от 1 до 19 %, содержание железа (в сплаве изменялось от 0,66 до 2,34 %) и величина добавляемого модификатора (изменение в интервале от 0,02 до 0,22 %). Состав модификатора варьировали в следующих соотношениях компонентов (в % по массе): 25...40 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 12...20 %  $\text{SiC}$ , 3...8 %  $\text{Ti}$ , остальное – S. Необходимость приведенного соотношения компонентов изложена в [9].

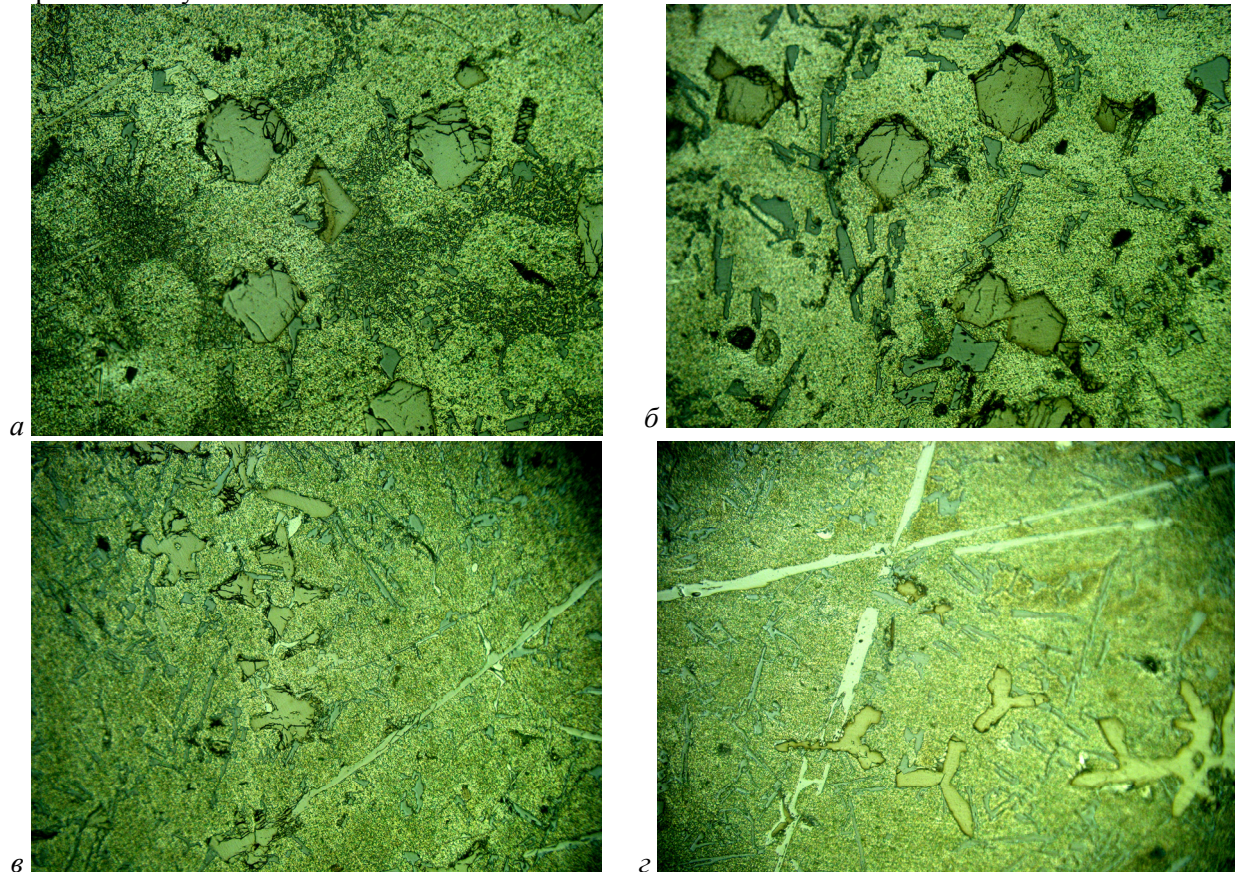


Рис. 1. Микроструктура ( $\times 500$ ) сплава АК9М2 в состоянии без термической обработки: *а* – 15,4 % С; 1,185 % Fe; 0,18 % М; *б* – 15,4 % С; 1,869 % Fe; 0,18 % М; *в* – 4,6 % С; 1,895 % Fe; 0,06 % М; *з* – 10 % С; 2,090 % Fe; 0,12 % М; (С – стружка; М – модификатор)

Микроструктуру сплавов после изготовления исследовали под световым микроскопом, с использованием методик количественной металлографии. Анализ и оценку степени влияния

конкретных параметров сплавов осуществляли с использованием методов математической статистики. В работе значительное внимание уделялось изучению влияния добавок стружки

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

алюминиевого сплава, количества железа и модификатора на жидкотекучесть и пористость получаемых сплавов.

## Результаты

Экспериментальные сплавы имели структуру типичную для доэвтектических сплавов, состоящую из  $\alpha$ -твердого раствора кремния и других элементов в алюминии ( $\alpha$ -Al) и эвтектики, состоящей из  $\alpha$ -Al и частиц разной формы на основе легированного кремния ( $\beta$ -Si), а также интерметаллидных включений (рис. 1, а).

В зависимости от состава шихты, содержания в ней стружки и присадки модификатора частицы кремния серо-зеленого цвета имели форму от близкой к глобулярной (рис. 1, б) до пластинчатой (рис. 1, в). Основными включениями интерметаллидов были железосодержащие фазы, наиболее часто встречалась фаза  $Al_5SiFe$  белого цвета, имевшая ярко выраженную пластинчатую форму, наиболее часто она встречалась в сплавах с повышенным содержанием железа (рис. 1, в, з). С целью анализа влияния исследуемых параметров на качество сплава (литейные свойства) использовались методы математической статистики. Результаты обработки позволили построить зависимости влияния количества стружки, концентрации железа и модификатора на жидкотекучесть и пористость сплава.

Как видно из рис. 2 а, б увеличение содержания стружки в шихте, а также количества железа в сплаве, в исследуемых пределах однозначно приводили к снижению жидкотекучести на 30...35 %.

Такое влияние железа можно объяснить образованием интерметаллидных фаз  $Al_3Fe$ ,  $Al_5SiFe$ , которые согласно [2, 6] имеют более высокую температуру плавления по сравнению с алюминиевыми сплавами, что приводит к увеличению вязкости жидкого металла и, как следствие, к снижению его жидкотекучести.

Увеличение присадки модификатора с 0,02 до 0,15 % приводило к повышению жидкотекучести на 10...15 %. При дальнейшем увеличении присадки модификатора жидкотекучесть оставалась практически неизменной (рис. 2, в). Увеличение содержания стружки с 1 до 19 % приводило к росту пористости с 0,5 до 2...2,5 балла ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93) (рис. 3.а). Такое явление можно объяснить повышенным содержанием газов и оксида алюминия  $Al_2O_3$  в

стружке и соответственно в сплаве. Железо не оказало существенного влияния на пористость сплава (рис. 3, б).

Модификатор, который применяли в настоящих исследованиях, предназначен для решения двух основных задач: перехода к глобулярной форме интерметаллидных фаз и снижения содержания газов в силуминах.

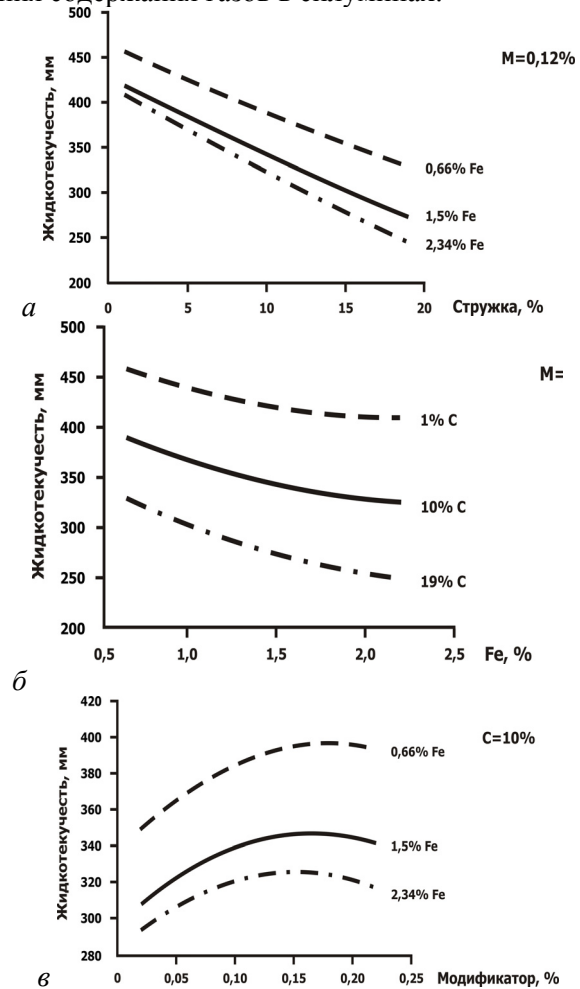


Рис. 2. Влияние металлургических факторов на жидкотекучесть сплава АК9М2: а – стружки; б – железа; в – модификатора

За счет последнего фактора можно объяснить существенное снижение с 2,5 до 0,5 балла пористости с увеличением присадки модификатора с 0,02 до 0,22 % (рис. 3, в).

На рис. 4 представлена зависимость линейной усадки  $\epsilon_L$  от исследуемых металлургических факторов. Некоторое уменьшение величины линейной усадки с ростом содержания стружки, на наш взгляд, объясняется увеличением газосодержания сплава. Тенденцию к



## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

снижению линейной усадки с увеличением в сплаве содержания железа можно объяснить образованием дополнительных центров кристаллизации в виде железосодержащих интерметаллидных фаз.

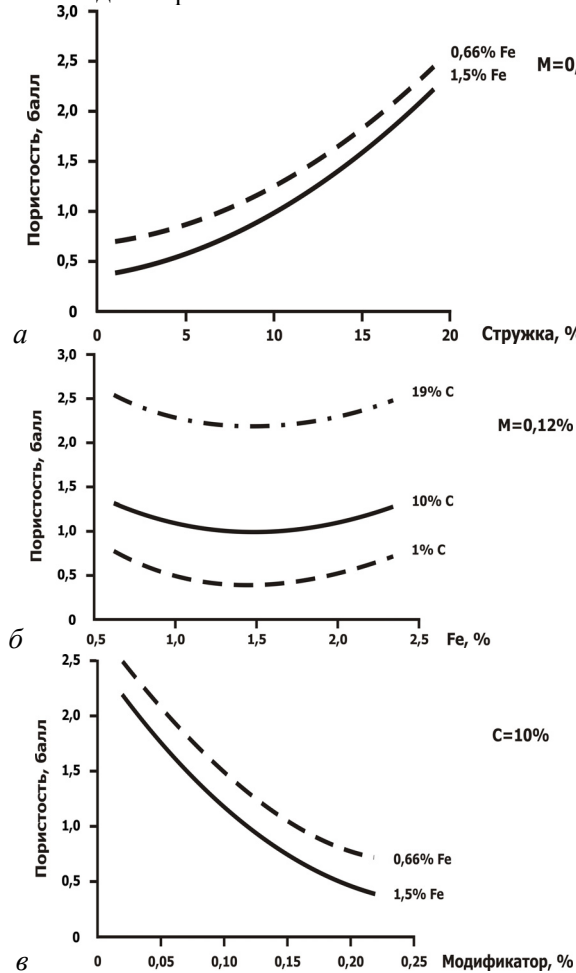


Рис. 3. Влияние металлургических факторов на пористость сплава АК9М2:

*a* – стружки; *б* – железа; *в* – модификатора

Увеличение модификатора приводит к повышению величины линейной усадки вследствие рафинирования жидкого металла, что согласуется с данными [5, 7].

#### Научная новизна и практическая значимость

Увеличение концентрации железа в составе силумина сопровождается снижением его жидкотекучести. При этом темп снижения жидкотекучести сплава пропорционален количеству растворенного железа. Характер влияния железа обусловлен образованием высокотемпера-

турных интерметаллидных соединений типа  $Al_3Fe$ ,  $Al_5SiFe$ , которые повышают вязкость металла.

Использование полученных научных результатов на практике позволило разработать технические решения, направленные на повышения качественных показателей силуминового сплава.

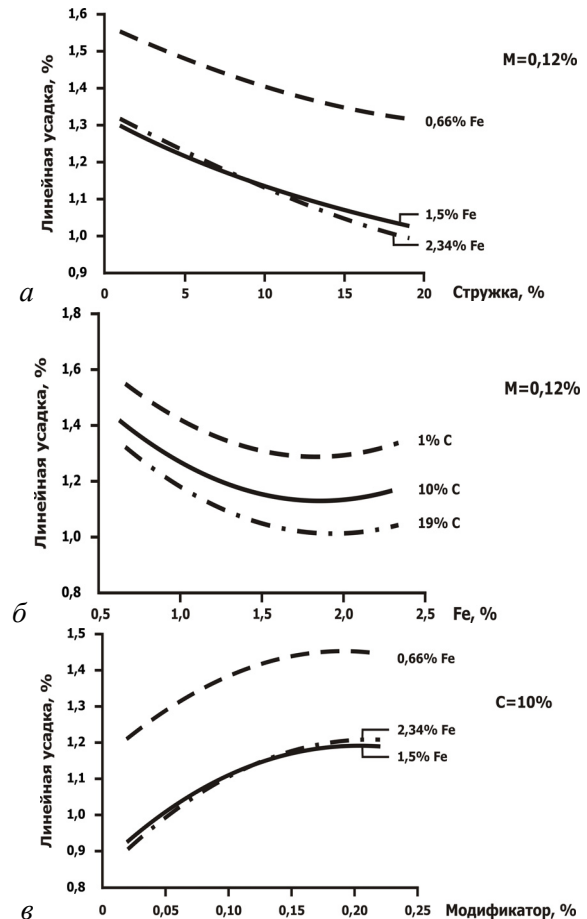


Рис. 4. Влияние металлургических факторов на линейную усадку сплава АК9М2:

*a* – стружки; *б* – железа; *в* – модификатора

#### Выводы

1. Использование в качестве шихты стружки в количестве до 10...15 % и присадок железа в сплаве до 1...1,5 % способствуют достижению достаточно высокого уровня свойств алюминиевого сплава.

2. Добавление модификатора в количестве до 0,1...0,15 %, способствуя рафинированию сплава, приводит к повышению его линейной усадки.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Волчок, И. П. Применение вторичных алюминевых сплавов в транспортном машиностроении / И. П. Волчок, О. В. Лютова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2007. – Вип. 14. – С. 225–227.
2. Диаграммы состояния металлических систем / Н. И. Ганина, А. М. Захарова, В. Г. Оленичева, Л. А. Петрова. – Вып. XXXIV. – М. : ВИНТИ, 1990. – 600 с.
3. Лютова, О. Підвищення якості вторинних алюмінієвих сплавів / О. Лютова, О. Мітяєв, І. Волчок // Машинознавство. – 2007. – № 8 (122). – С. 32–35.
4. Мітяєв, О. А. Підвищення якості алюмінієвих сплавів методами рафінування та модифікування / О. А. Мітяєв, О. Л. Скуйбіда // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 29. – С. 195–197.
5. Модифицирование сплава АК6М2 / В. И. Никитин, А. И. Ивашкевич, А. В. Ивлев, А. Н. Лесницкий, Е. Б. Пронь // Литейное производство. – 1999. – № 1. – С. 30–31.
6. Мондольфо, Л. Ф. Структура и свойства алюминевых сплавов / Л. Ф. Мондольфо. – М. : Металлургия, 1979. – 640 с.
7. Скуйбіда, О. Л. Підвищення механічних властивостей вторинного силуміну АК5М2 / О. Л. Скуйбіда, І. П. Волчок // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 34. – С. 215–218.
8. Пат. 57584А Україна, МКВ С22С1/06. Модифікатор для алюмінієвих сплавів / Волчок І. П., Мітяєв О. А. (Україна) ; заявник і патенто-власник Запорізький нац. техн. ун-т. – № 2002108343 ; заявл. 22.10.2002 ; опубл. 16.06.2003, Бюл. № 6. – 4 с.
9. Скуйбіда, О. Л. Підвищення якості алюмінієвих сплавів за рахунок модифікування / О. Л. Скуйбіда, І. П. Волчок // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна – Д., 2011. – Вип. 37. – С. 235–237.
10. Engler, S. Continuous monitoring of the degassing process in aluminium melts / S. Engler, X.-G. Chen, F.-J. Klinkenberg // Cast Metals – 1995. – № 8 (1). – P. 27–34.
11. Koewius, A. Aluminium, automobil und recycling einige grundsätzliche aspekte / A. Koewius // Automobiltechnische Zeitschrift. – 1995 – № 4. – P. 248–250.
12. Lyutova, O. V. Increase of foundry properties of secondary silumins / O. V. Lyutova, I. P. Volchok // Archives of foundry engineering. – 2008. – Vol. 8. – P. 89–91.
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.

О. В. ЛЮТОВА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Нарисна геометрія та комп'ютерна графіка», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061) 769 85 32, ел. пошта tmzntu@gmail.com

## ПІДВИЩЕННЯ ЛИВАРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВТОРИННИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

**Мета.** Вивчити вплив металургійних чинників виробництва на ливарні властивості вторинного алюмінієвого сплаву АК9М2. **Методика.** Для експериментальних плавок в якості незалежних змінних були вибрані кількість стружки в шихті, зміст заліза і величина присадки модифікатора. Компоненти модифікатора змінювалися в інтервалах 25...40 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 12...20 %  $\text{SiC}$ , 3...8 %  $\text{Ti}$ , решта – S. Мікроструктуру сплавів досліджували під світловим мікроскопом, з використанням методик кількісної металографії. Аналіз впливу конкретних параметрів сплавів здійснювали з використанням методів математичної статистики. Вивчали вплив добавок стружки, кількість заліза і модифікатора на рідкотекучість і пористість отримуваних сплавів. **Результати.** У роботі показано, що збільшення вмісту стружки в шихті від 1 до 19 % і кількості заліза в сплаві від 0,66 до 2,34 % призводило до зниження рідкотекучості сплаву на 30...35 %. Одночасно спостерігалось зменшення лінійної усадки на 18...20 % і приросту пористості від 0,5 до 2,5 балів. Представлені зміни ливарних властивостей сплаву обумовлені кількістю інтерметалідних фаз несприятливої форми і його здатністю до насичення газами. Збільшення присадки модифікатора з 0,02 до 0,15 % призводило до підвищення рідкотекучості на 10...15 %, зростанню лінійної усадки на 30...35 % і зниженню пористості з 2,5 до 0,5 балу. Одночасно спостерігалась зміна форми інтерметалідних фаз і зростання рівномірності їх розподілу. **Наукова новизна.** Збільшення концентрації заліза у складі силуміну супроводжується зниженням його рід-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

котекучості. При цьому темп зниження рідкотекучості сплаву пропорційний кількості розчиненого заліза. Характер впливу заліза обумовлений утворенням високотемпературних інтерметалідних з'єднань типу Al<sub>3</sub>Fe, Al<sub>5</sub>SiFe, які підвищують в'язкість металу. **Практична значимість.** Використання отриманих наукових результатів на практиці дозволило розробити технічні рішення, які спрямовані на підвищення якісних показників силумінового сплаву.

*Ключові слова:* вторинні алюмінієві сплави; рідкотекучість; лінійна усадка; пористість; модифікатор

O. V. LYUTOVA<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Деп. «Descriptive Geometry, Engineer and Computer Graphics», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy Str., 64, 69063, Zaporizhzhia, Ukraine, tel. +38 (061) 769 85 32, e-mail tmzntu@gmail.com

## INCREASING OF FOUNDRY PROPERTIES OF SECONDARY ALUMINIUM ALLOYS

**Purpose.** To study the influence of metallurgical factors of production on casting properties of secondary aluminum alloy AK9M2. **Methodology.** For the experimental melts shaving amount in a charge, iron content and the quantity of modifier additive were chosen as independent variables. The components of modifier were being changed in the intervals of 25...40 % Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 12...20 % SiC, 3...8 % Ti, the other – S. The microstructure of alloys was investigated under a light microscope, using the method of quantitative metallography. Influence analysis of certain parameters of alloys was conducted by mathematical statistics methods. The influence of shaving additions, iron and modifier amount on liquidity and porosity of the resulting alloys was studied. **Findings.** The paper shows that the increase of shaving content in the charge from 1 to 19 % and iron content in alloy from 0.66 to 2.34 % resulted in the decline of alloy liquidity on 30...35 %. Simultaneously the linear shrinkage reduction for 18...20 % and the porosity increase from 0.5 to 2.5 points were observed. The presented changes of alloy casting properties are conditioned by the amount of intermetallic phases of unfavorable form and its capacity for aeration. Increase of modifier additive from 0.02 to 0.15 % resulted in the liquidity increase on 10...15 %, the increase of linear shrinkage on 30...35 % and porosity decline from 2.5 to 0.5 points. At the same time a change of form of intermetallic phases and increase of their evenness were observed. **Originality.** The increase of iron concentration in silumin composition is accompanied by the decline of its liquidity. Thus, the rate of decline of alloy liquidity is proportional to the amount of dissolved iron. The character of iron influence is caused by formation of high temperature intermetallic compounds of the type Al<sub>3</sub>Fe, Al<sub>5</sub>SiFe, which promote the metal viscosity. **Practical value.** Practical use of the obtained scientific results would develop the technical solutions oriented to the quality indicator increase of silumin alloy.

*Keywords:* secondary aluminum alloys; liquidity; linear shrinkage; porosity; modifier

### REFERENCES

1. Volchok I.P., Lyutova O.V. Primeneniye vtorichnykh alyuminiyevykh splavov v transportnom mashinostroyeni [Use of the secondary aluminum alloys in the transport machine building]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryn], 2007, issue 14, pp. 225-227.
2. Ganina N.I., Zakharova A.M., Olenicheva V.G., Petrova L.A. *Diagrammy sostoyaniya metallicheskih sistem* [Structural diagram of the metal systems], 1990, issue XXXIV, 600 p.
3. Liutova O., Mitiaiev O., Volchok I. Pidvyshchennia yakosti vtorynnykh aliuminiyevykh splaviv [Quality improvement of the secondary aluminum alloys]. *Mashynoznavstvo – Machine Science*, 2007, no. 8 (122), pp. 32-35.
4. Mitiaiev O.A., Skuibida O.L. Pidvyshchennia yakosti aliuminiyevykh splaviv metodamy rafinuvannia ta modyfikuvannia [Quality improvement of the secondary aluminum alloys by means of refinement and modification]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryn], 2009, issue 29, pp. 195-197.
5. Nikitin V.I., Ivashkevich A.I., Ivlev A.V., Lesnitskiy A.N., Pron Ye.B. Modifitsirovaniye splava AK6M2 [Modification of the AK6M2 alloy]. *Liteynoye proizvodstvo – Foundry engineering*, 1999, no. 1, pp. 30-31.
6. Mondolfo L.F. *Struktura i svoystva alyuminiyevykh splavov* [Structure and properties of aluminum alloys].

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 640 p.
7. Skuibida O.L., Volchok I.P. Pidvyshchennia mekhanichnykh vlastyvostei vtorynnoho syluminu AK5M2. [Mechanical properties improvement of the secondary silumin AK5M2]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryn], 2010, issue 34, pp. 215-218.
  8. Volchok I.P., Mitiaiev O.A. *Modyfikator dlia aliuminiievkykh splaviv* [Modifier for aluminum alloys]. Patent UA, no. 2002108343, 2003.
  9. Skuibida O.L., Volchok I.P. Pidvyshchennia yakosti aliuminiievkykh splaviv za rakhunok modyfikuvannia [Aluminum alloys quality improvement using modification]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryn], 2011, issue 37, pp. 235-237.
  10. Engler S., Chen X.-G., Klinkenberg F.-J. Continuous monitoring of the degassing process in aluminum melts. *Cast Metals*, 1995, no. 8 (1), pp. 27-34.
  11. Koewius A. Aluminium, Automobil und Recycling einige grundsätzliche Aspekte. *Automobiltechnische Zeitschrift*, 1995, no. 4, pp. 248-250.
  12. Lyutova O.V., Volchok I.P. Increase of foundry properties of secondary silumins. *Archives of foundry engineering*, 2008, vol. 8, pp. 89-91.
  13. Puga. H., Barbosa J., Soares D., Silva F., 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 к.т.н., доц. Л. И. Котовой (Украина); к.т.н., доц. О. А. Чайковским (Украина)

Поступила в редколлегию 27.03.2013

Принята к печати 04.06.2013