

УДК 669.714.1

НАСЛЕДСТВЕННОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

ФРОЛОВ Р.А.^{1*}, аспирант,
МИТЯЕВ А.А.², д.т.н., проф.,
ВОЛЧОК И.П.³ д.т.н., проф.,
ПЕТРАШЕВ А.С.⁴

^{1*}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

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

³кафедра «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

⁴кафедра «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: 0000-0003-4880-2216

Аннотация. Цель. Повышение механических свойств вторичных литейных алюминиевых сплавов АК7ч и А356.2. Разработка новой ресурсосберегающей технологии их рециклинга. **Методика.** Материалом для данного исследования выбран сплав АК7ч и его аналог А356.2. Часть шихты была переработана в мелкокристаллический переплав путем разливки жидкого металла температурой 720 °С в воду при температуре 20°С. Экспериментальные плавки с различным составом исходной шихты, различной обработкой модифицирующим комплексом и различной концентрацией железа проводили в электрической печи сопротивления. Исследование структуры и контроль механических свойств осуществляли на образцах, изготовленных согласно ГОСТ 1497-84 после термической обработки по режиму Т6. **Результаты.** Проведенные исследования показали, что комплексное применение модифицирующей обработки и мелкокристаллического переплава способно значительно повысить механические свойства вторичных алюминиевых сплавов. **Научная новизна.** Получены зависимости предела прочности, относительного удлинения и твердости от количества модифицирующего комплекса и мелкокристаллического переплава в исходной шихте. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют применить комплексную технологию переработки вторичного сырья для получения качественных отливок в промышленных условиях.

Ключевые слова: алюминий; интерметаллидные фазы; структура; наследственность; рециклинг; модифицирующая обработка

СПАДКОВЕ МОДИФІКУВАННЯ ВТОРИННИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

ФРОЛОВ Р.О.^{1*}, аспірант,
МІТЯЄВ О.А.², д.т.н., проф.,
ВОЛЧОК І.П.³ д.т.н., проф.,
ПЕТРАШОВ О.С.⁴

^{1*}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

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

³кафедра «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

⁴кафедра «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: 0000-0003-4880-2216

Анотація. Мета. Підвищення механічних властивостей вторинних ливарних алюмінієвих сплавів АК7ч і А356.2. Розробка нової ресурсозберігаючої технології їх рециклінгу. **Методика.** Матеріалом для даного дослідження обрано сплав АК7ч і його аналог А356.2. Частина шихти була перероблена в дрібнокристалічний переplав шляхом розливання рідкого металу температурою 720 °С в воду при температурі 20°С. Експериментальні плавки з різним складом вихідної шихти, різною обробкою модифікуючим комплексом і різною концентрацією заліза проводили в електричній печі опору. Дослідження структури і контроль механічних властивостей здійснювали на зразках, виготовлених відповідно до ГОСТ 1497-84 після термічної обробки по режиму Т6. **Результати.** Проведені дослідження показали що комплексне застосування модифікуючої обробки і дрібнокристалічного переplаву здатне значно підвищити механічні властивості вторинних алюмінієвих сплавів. **Наукова новизна.** Отримано залежності межі міцності, відносного видовження і твердості від кількості модифікуючого комплексу і дрібнокристалічного переplаву в початковій шихті. **Практична значимість.** Отримані результати дозволяють застосувати комплексну технологію переробки вторинної сировини для отримання якісних виливків в промислових умовах.

Ключові слова: алюміній; інтерметалідні фази; структура; спадковість; рециклінг; модифікуюча обробка

HEREDITARY MODIFICATION OF SECONDARY ALUMINUM ALLOYS

FROLOV R. A.^{1*}, *postgraduate*,
MITYAYEV A. A.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
VOLCHOK I. P.³ *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
PETRASHEV A.S.⁴

^{1*}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

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

³Department 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

⁴Department 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: 0000-0003-4880-2216

Annotation. Purpose. Increase of mechanical properties of secondary aluminum alloys AK7ch and A356.2. Development of resource-saving technologies of recycling of the alloys. **Methodology.** Material for this study were AK7ch and A356.2 alloys. Part of charge was the fine-crystalline remelt produced by cooling of liquid metal at temperature 720°C in water at temperature 20°C. Experimental melting with different composition of initial charge, different modification and iron content was carried out in the electrical resistance furnace. Control structure and mechanical properties was performed on samples prepared in accordance with GOST 1497-84 after heat treatment T6 mode. **Findings.** Studies conducted shown applicating complex modification and heredity can increases mechanical properties of secondary aluminum alloys. **Originality.** Influence of strength limit, elongation and hardness from modification complex and quantity of fine-crystalline remelt in initial charge. **Practical value.** Offered results may be used complex technology recycling secondary raw material to order high-quality castings in industry.

Key words: aluminum; intermetallic phases; structure; heredity; recycling; modifying treatment.

Введение

Алюминиевые литейные сплавы, благодаря их физическим и механическим свойствам все чаще применяются в машиностроении взамен чугуна и стали. Низкая стоимость вторичного сырья обуславливает высокий интерес к поискам новых методов его переработки. Известно, что сплавы на основе алюминия обладают наследственностью, то есть структура и механические свойства шихты в определенной степени сохраняются в отливке [1,2]. Анализ последних исследований показывает, что качество литых алюминиевых деталей в основном

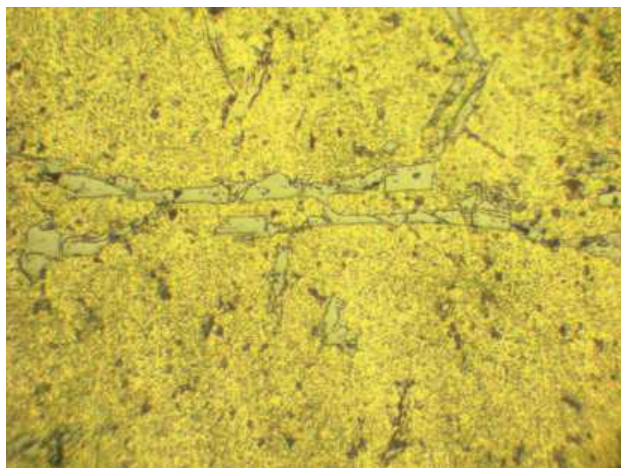
зависит от следующих факторов: технологических параметров литья, наличия в сплаве посторонних примесей (в частности железа) и размера структурных составляющих шихты [3-5]. Разработано множество методов воздействия на расплав с целью повышения механических свойств деталей, которые как правило оказывают влияние на один из вышеперечисленных факторов [6]. Потому в последнее время все более широкое применение находят технологии комплексного воздействия на расплав [4,5].

Цель

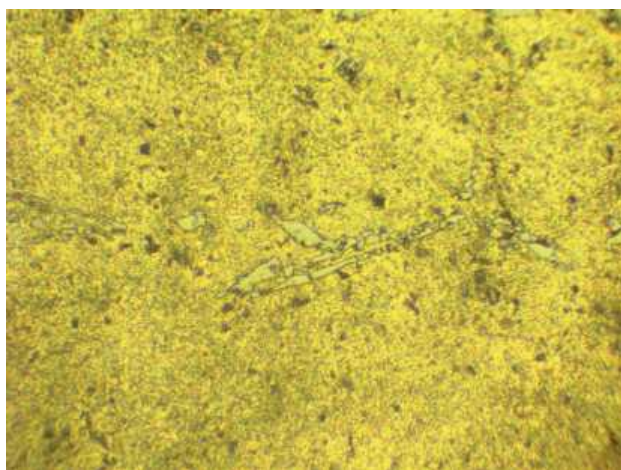
Основной задачей данного исследования являлась разработка ресурсосберегающей технологии переработки отходов собственного производства из сплавов АК7ч и А356.2, включающей обработку модифицирующим комплексом МК-1[7] и замену части шихты специально подготовленным мелкокристаллическим переплавом.

Материал

В качестве материала для настоящего исследования применялся сплав состоящий из возврата доэвтектических сплавов АК7ч и его зарубежного аналога А356.2 (см. табл. 1) в пропорциях по массе 1:1. Данная шихта обладала грубой кристаллической структурой (см. рис. 1).



a



б

Рис. 1. Микроструктура шихты $\times 400$: *a* – АК7ч; *б* – А356.2 / Microstructure of the charge $\times 400$: *a* – АК7ч; *б* – А356.2

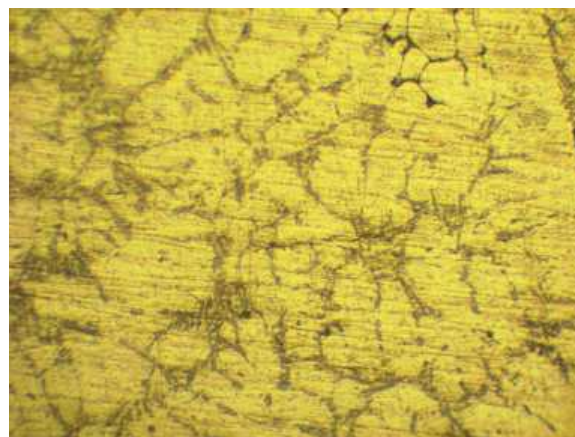
Таблица 1

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

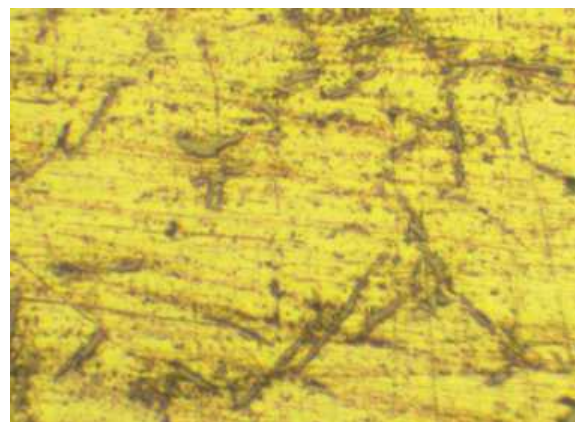
Сплав	Содержание элементов, масс. %						
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
АК7ч	6,72	0,60	0,05	0,08	0,32	0,02	0,01
А356.2	7,07	0,11	0,02	0,02	0,23	0,03	0,07

Методика

Согласно составленного рототабельного плана полного факторного эксперимента 2^3 было проведено 20 опытных плавок массой по 3 кг. Расплав готовили в электрической печи сопротивления. Часть шихты прошла предварительную переработку закалочным отверждением путем разливки жидкого металла при температуре $720\text{ }^\circ\text{C}$ через емкость с перфорированным дном в воду $20\text{ }^\circ\text{C}$. В результате чего был получен мелкокристаллический переплав (МКП) в виде гранул $\text{Ø } 10\text{...}20\text{ мм}$ с ультрадисперсной структурой (см. рис.2).



a



б

Рис. 2. Микроструктура МКП: *a* – $\times 400$; *б* – $\times 1000$ / Microstructure of the fine-crystalline remelt: *a* – $\times 400$; *б* – $\times 1000$

В качестве переменных независимых факторов было принято: содержание МКП в исходной шихте от 0 до 84,1 %, содержание Fe от 0,16 до 1,84 % и количество модифицирующего комплекса от 0,016 до 0,184 %. Содержание Fe в каждой плавке согласно матрице эксперимента выравнивалось путем дошихтовки расплава при температуре 720 °С железным порошком ПЖР2 [8]. Перед разливкой в стальной кокиль расплав подвергался обработке модифицирующим комплексом МК-1. Термообработку проводили по режиму Т6 согласно ГОСТ 1583-93, после чего изготавливали шлифы для изучения микроструктуры и образцы для механических испытаний. Для изучения микроструктуры использовался оптический микроскоп SIGETA MM-700 при увеличении в 400 раз после обработки поверхности шлифа водным раствором кислот 0,5 % HF+0,5 % HNO₃+1,5 % HCl в течение 10с. Статистическая обработка результатов проводилась с использованием методов статистического анализа и программы MicrosoftExcel2007 [9].

Результаты

Сплавы, обработанные по комплексной технологии имели структуру, состоящую из алюминиевой матрицы (α -твердый раствор Si и других примесей в Al), эвтектического Si и интерметаллидных фаз Al₃FeSi, Al₃Fe, Al₂Fe[4] (см. рис. 3). В зависимости от состава шихты, содержания Fe и количества применяемого модификатора частицы кремния и железосодержащих фаз изменяли свой размер и форму, что явилось основным фактором, влияющим на механические свойства сплавов, что согласуется с результатами работ [3,4,10].

Представленные структуры «звездных» точек матрицы планирования эксперимента отображают влияние изучаемых факторов на структурные изменения и механические свойства сплава (см. рис 3,4 и 5).

Повышение содержания МКП шихте от 0 до 84,1% привело к диспергированию кремния и интерметаллидных включений (см. рис. 3 а, б). Увеличение концентрации Fe с 0,16 до 1,84% приводило к образованию в сплаве большого количества вытянутых интерметаллидных фаз (см. рис. 3 в, г). Возрастающая присадка модификатора МК-1 активно влияла на размер и форму основных структурных составляющих.

Результаты статистической обработки позволили получить неизвестные ранее зависимости для предела прочности, относительного удлинения и твердости от исследуемых факторов. Зависимости имеют точку экстремума в пределах области исследования, что свидетельствует о рациональном выборе интервалов варьирования изучаемых факторов.

Применение шихты, содержащей 30...45% МКП позволяет повышать предел прочности σ_B на 30...40

МПа, относительное удлинение δ на 1...2% и твердость HRB на 2...6 ед. (см. рис 4). Дальнейшее увеличение МКП в шихте приводит к снижению механических свойств, что вероятно связано с загрязнением сплава оксидом алюминия Al₂O₃.

Обработка модифицирующим комплексом МК-1 позволяет достичь повышения предела прочности на 15...30 МПа, относительного удлинения на 1...1,3% и твердости на 7...8 ед. (см. рис 5). Повышение механических свойств достигнуто в результате измельчения и изменения формы кристаллов первичного кремния и интерметаллидов (см. рис. 3 д, е). Возрастание концентрации Fe в сплаве привело к снижению пластичности и повышению твердости (см. рис. 3,4) на всем интервале исследований. В концентрациях до 1,0% Fe железо повышало предел прочности в следствие упрочнения твердого раствора Al. Более высокие концентрации Fe приводили к снижению σ_B в следствие образования вытянутых интерметаллидных фаз, имеющих низкую когерентную связь с матрицей и выступающих в роли активного концентратора напряжений, что согласуется с полученными ранее результатами [4,10].

Научная новизна и практическая ценность

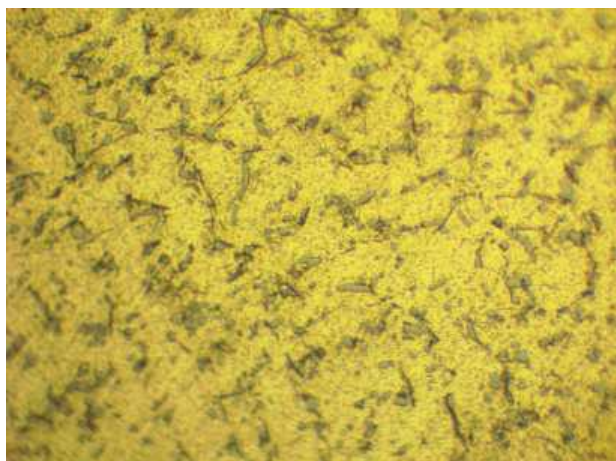
Впервые получены зависимости σ_B , δ , HRB от количества МКП, Fe и модификатора для вторичных сплавов АК7ч и А356.2. Показаны новые возможности повышения механических свойств вторичных силуминов, в результате обработки расплава модифицирующим комплексом МК-1в сочетании с использованием МКП. Полученные результаты позволили применить разработанную комплексную технологию для получения качественных отливок из отходов производства в промышленных условиях.

Выводы.

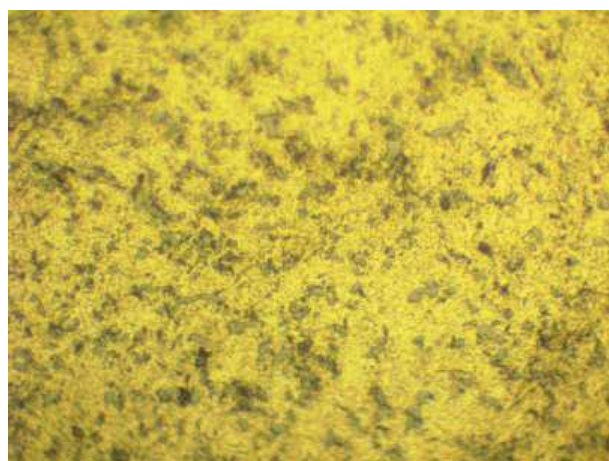
1. Применение общеизвестных методов управления структурой и свойствами отливок из алюминиевых сплавов не всегда обеспечивают необходимое качество деталей, изготовленных из вторичного сырья, в связи с негативным влиянием шихты и примесей железа.

2. Установлено, что получение отливок с высокими показателями механических свойств $\sigma_B > 300$ МПа, $\delta > 5\%$ и HRB > 50 для литейных сплавов АК7ч и А356.2 возможно при применении модифицирующей обработки МК-1 до 0,1% и МКП до 45% в составе шихты.

3. Использование шихтовых материалов с благоприятной наследственной структурой позволяет сократить количество применяемых модифицирующих добавок, что в свою очередь значительно снижает выбросы газов и улучшает экологическую обстановку в литейном цехе.



a



б



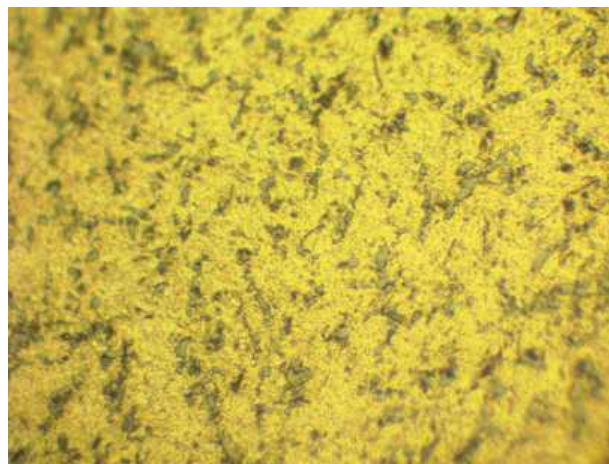
в



г



д



e

Рис. 3. Микроструктура сплава АК7ч x400: а – 0%МКП 1,0% Fe 0,1%МК-1; б – 84,1%МКП 1,0% Fe 0,1%МК-1; в – 42,05%МКП 0,16% Fe 0,1%МК-1 ; г – 42,05%МКП 1,84% Fe 0,1%МК-1; д – 42,05%МКП 1,0% Fe 0,016%МК-1 ; е – 42,05%МКП 1,0% Fe 0,184%МК -1/ Microstructure of the melting AK7ch x400

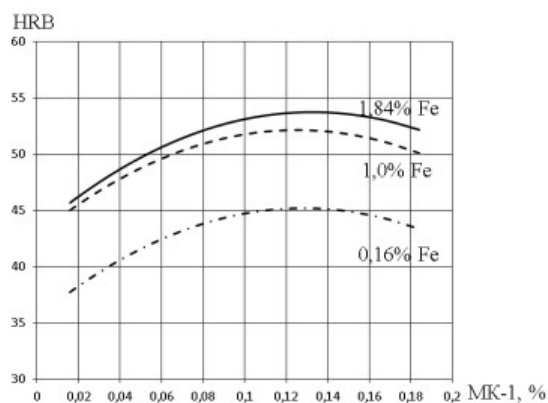
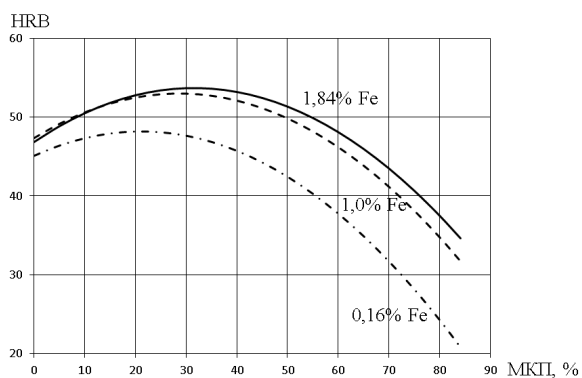
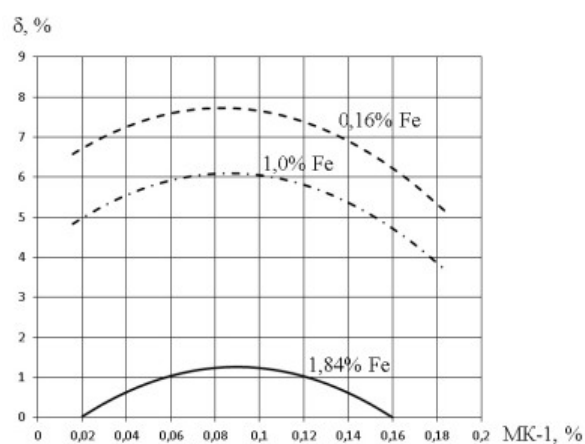
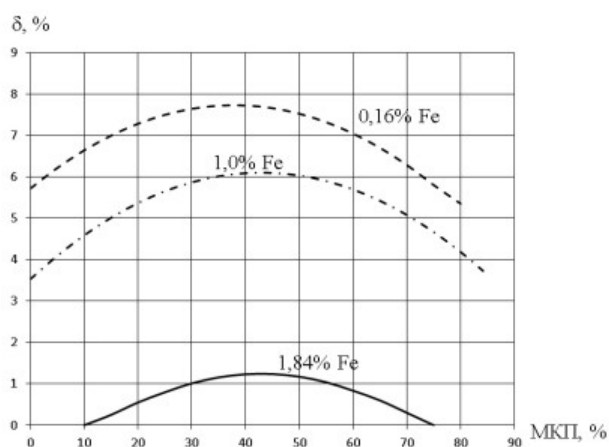
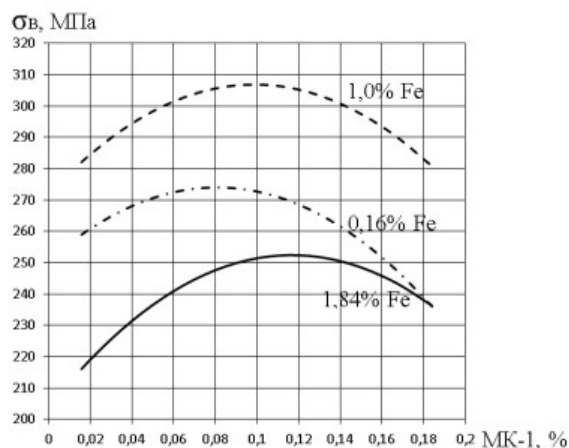
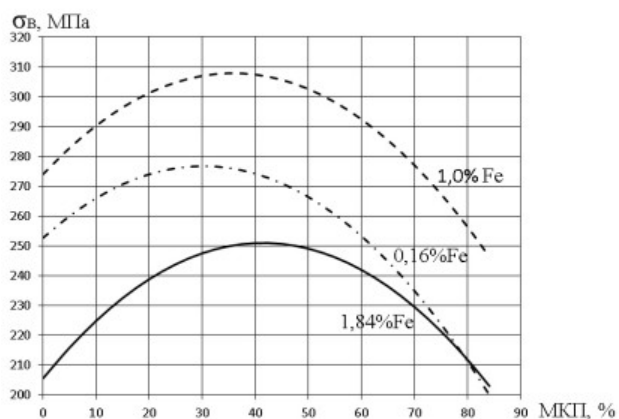


Рис. 4. Влияние состава шихты и концентрации Fe, на механические свойства сплава АК7ч при обработке расплава 0,1% МК-1 / Influence of the composition of the charge and the concentration of Fe on the mechanical properties of the АК7ch alloy when melt processing a 0.1% МК-1

Рис. 5. Влияние количества МК-1 и концентрации Fe, на механические свойства сплава АК7ч при наличии в шихте МКП 42,05% / Influence of the amount of МК-1 and Fe concentration on the mechanical properties of the АК7ch alloy in the presence of a fine-crystalline remelt charge of 42.05%

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Марукович Е.И. Модифицирование сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко. – Минск : Беларуская навука, 2009. – 192с.
2. Никитин В.И. Развитие и применение явления структурной наследственности в алюминиевых сплавах / В. И. Никитин, К. В. Никитин //Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2014. – № 4– с. 424-429– Режим доступа: <http://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/13236>.
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. Доценко Ю. В. Влияние комплексной технологии на свойства отливки 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.
5. Немененко Б.М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов. – Мн.: Технопринт, 1999. – 1072с.
6. Марукович Е.И. Повышение эффективности модифицирования / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Литье и металлургия. 2006. №2. С. 151-152.
7. 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.
8. ГОСТ 9849-86 Порошок железный. Технические условия. – Введ. 1987-06-30. –М.: Изд-во стандартов, 1987.— 9 с. Режим доступа: <http://vsegost.com/Catalog/19/19859.shtml>.
9. Борздова Т.В. Основы статистического анализа и обработка данных с применением Microsoft Excel. – Минск : ГИУСТ БГУ, 2011. – 75с.
10. Волчок И. П. Повышение механических свойств вторичных сплавов АК7ч и А356.2 / И. П. Волчок, А. А. Митяев, Р. А. Фролов, К. Н. Лоза, В. В. Клочихин, В. В. Лукинов // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Стародубовские чтения. - 2016. - Вып. 90. - С. 64–70. - Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmssc_2016_90_10.

REFERENCES

1. Marukovich E.I. *Modifitsirovanie splavov* [Modifying alloys]. Minsk: Belaruskaya navuka, 2009, 192p. (in Russian).
2. Nikitin V.I and Nikitin K.V. *Razvitie i primeneniye yavleniya strukturnoi nasledstvennosti v aliuminiyevykh splavakh*[Development and application of the phenomenon of structural heredity in aluminum alloys] [Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies]. SFU, 2014, no. 4, pp. 424-429 Available at: <http://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/13236> (in Russian).
3. Lyutova O.V. *Povyisheniye liteynykh svoystv vtorichnykh alyuminievykh splavov* [Increasing of founding properties of secondary aluminium alloys]. *Nauka ta progres transportu. VIsnik DnIpropetrovskogo natsionalnogo univrsitetu zalzничного transportu Imeni akademika V. Lazaryana*. [Science and transport progres. Bulletin of dniproetrovsk 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. Dotsenko Yu.V. and Seliverstov V.Yu. *Vliyaniye kompleksnoy tehnologii na svoystva otlivok iz splava AK7ch s povyishennyim sodержaniem zheleza* [Influence of complex technology on the properties of castings Alloy AK7ch with a high iron content]. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tehnologiy* [Eastern-European journal of enterprise technologies]. 2011, no. 54, pp. 45–48. Available at: journals.uran.ua/eejet/article/download/2282/2086. (in Russian).
5. Nemenenok B.M. *Teoriya i praktika kompleksnogo modifitsirovaniya siluminov* [Theory and practice of complex modification silumin]. Minsk.: Tehnoprint, 1999, 1072p. (in Russian).
6. Marukovich E.I. and Stetsenko V.U. *Povysheniye effektivnosti modifitsirovaniya* [Increase the efficiency of modification]. *Litie i metalurgiya* [Casting and metallurgy], 2006, no. 2, pp. 151–152. (in Russian).
7. 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).
8. GOST 9849-86. *Poroshok zheleznyi. Tekhnicheskie usloviya* [Iron powder. Specifications]. Moscow, Standartform Publ., 1987, 9 p. Available at: <http://vsegost.com/Catalog/19/19859.shtml>. (in Russian).
9. Borzdova T. V. *Osnovy statisticheskogo analiza i obrabotka dannykh s primeneniem Microsoft Excel* [Basics of statistical analysis and data processing using Microsoft Excel]. Minsk.: GIUST BGU, 2011, 75p. (in Russian).
10. Volchok I. P., Mityaev A. A., Frolov R.A., Loza K.N., Klochihin V.V. and Lukinov V.V. *Povysheniye mekhanicheskikh svoystv vtorichnykh splavov AK7ch i A356.2* [Increase of mechanical properties of secondary alloys AK7ch and A356.2] *Stroitelstvo. Materialovedeniye. Mashinostroeniye. Seriya Starodubovskie chteniya* [Building. Material science. Mechanical engineering. Series: Starodubov readings.] 2016, no. 90, pp. 64-70. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmssc_2016_90_10. (in Russian).

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