

Підвищення опору руйнуванню вторинних силумінів

І. П. Волчок, доктор технічних наук, професор, професор кафедри, tmzntu@gmail.com

О. А. Мітяєв, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри

О. В. Лютова, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри, liutova@zp.edu.ua

О. О. Круліковська, аспірант

Т. В. Ванярха, магістр

Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя

Досліджено вплив комплексного рафінувально-модифікувального оброблення на мікроструктуру, опір руйнуванню, фізико-механічні та службові властивості вторинних силумінів. Матеріалом даного дослідження були силуміни АК9М2 та АК8М3, отримані із дешевої вторинної сировини. Показано, що зі збільшенням частки вторинних матеріалів в шихті структура сплавів є менш впорядкованою і диференційованою, зі зростаючою кількістю інтерметалідних фаз несприятливих форм, розмірів і розподілу.

Аналіз мікромеханізмів руйнування сплавів показав, що в умовах статичного розтягування, мало- та багато циклової втоми найбільший внесок у процеси руйнування та зниження механічних властивостей вносить фаза Al_5SiFe , яка має моноклінну кристалічну ґратку, великі розміри та високий параметр форми λ . Встановлена схильність фази Al_5SiFe при статичних і циклічних навантаженнях до розширення та утворення в ній мікротріщин, які переходять у металеву основу.

З метою ефективного підвищення якості вторинних силумінів та забезпечення необхідного рівня механічних, технологічних і експлуатаційних властивостей було розроблено рафінувально-модифікувальний комплекс. Проведені дослідження показали високу ефективність розробленого рафінувально-модифікувального комплексу, що дозволило значно покращити мікроструктуру дослідних сплавів, підвищити рівень фізико-механічних властивостей та опір руйнуванню. Науковою новизною є встановлення та наукове обґрунтування технологічних основ формування мікроструктури, фізико-механічних і службових властивостей вторинних силумінів. Практична значимість роботи полягає в запропонованні вдосконалення технологічних процесів, що за рахунок високоефективних рафінувально-модифікувальних комплексів забезпечують суттєве підвищення опору руйнуванню, фізико-механічних і службових властивостей силумінів, котрі отримані з низькосортної шихти.

Ключові слова: вторинні силуміни, мікроструктура, інтерметалідні фази, модифікувальна обробка, шихта, опір руйнуванню, механічні властивості.

На сьогодні застосовують два промислових способи отримання алюмінію та його сплавів: шляхом електролізу глинозему Al_2O_3 у розплавленому кріоліті Na_3AlF_6 за температур 930...950 °С, та шляхом використання у

якості шихти лому і відходів виробництва (ливники, брак, стружка алюмінію та його сплавів). До переваг першого методу слід віднести високу чистоту алюмінію, до недоліків – високовитратні технології отримання глинозему, кріоліту, вугільних матеріалів і проведення процесу електролізу. Для отримання 1 т алюмінію витрачається близько 2 т глинозему, 25 кг кріоліту, 500...600 кг анодної (вугільної) маси. Витрати електроенергії тільки на електроліз 1 т алюмінію становлять 14000...16000 кВт · год. У собівартості електролізного отримання алюмінію витрати на вихідні матеріали складають близько 50 %, а на електроенергію до 30 % [1]. Слід відзначити також вагомі екологічні проблеми, що мають місце при виробництві алюмінію методом електролізу.

Перевагою другого методу є низька вартість вихідної шихти, скорочення питомих енерговитрат і небезпечних викидів у навколишнє середовище до 20 разів, недоліком – її забруднення неметалевими матеріалами, мастилами та іншими домішками, що викликають підвищену поруватість металу, а також формування грубої структури з крупними інтерметалідними включеннями пластинчастої форми і, як наслідок, низьких технологічних, механічних і експлуатаційних властивостей при цьому [2].

Основний внесок у погіршення фізико-механічних властивостей вторинних Al-Si сплавів чинять залізовмісні фази Al_5SiFe , $\text{Al}_4\text{Si}_2\text{Fe}$, $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ грубокристалічної будови, несприятливої пластинчастої форми, які відіграють роль концентраторів напружень.

У ході аналізу літературних джерел і результатів власних експериментів було з'ясовано, що найбільш дієвим способом впливу на хімічний склад і форму залізовмісних фаз в структурі вторинних силумінів, є модифікування.

У зв'язку з цим виконано дослідження, щодо розробки складу модифікувального комплексу МК-1, який забезпечує рафінування рідкого металу та позитивно впливає на структуру і властивості силумінів, отриманих з вторинної сировини [3].

В якості основного компонента модифікувального комплексу була обрана сірка, котра має позитивний вплив на розплави алюмінієвих сплавів [4], забезпечує зміну форми залізовмісних фаз з пластинчастої на компактну близьку до рівновісної, а також у вигляді китайських ієрогліфів. При цьому зменшуються розміри інтерметалідів і підвищується рівномірність їх розташування в об'ємі металу.

Для уповільнення швидкості окислення та видалення сірки до складу модифікатора введені Na_2CO_3 і BaCO_3 . Дисоціація цих сполук у розплаві проходить з виділенням вуглекислого газу CO_2 , пухирці якого забезпечують підвищення рівня рафінування. Включення до складу модифікувального комплексу гексафтортитанату калію K_2TiF_6 підвищує ефективність модифікування дендритів α -твердого розчину кремнію в алюмінії, зменшує розмір їх комірок і загальну довжину. Наявність атомарного титану забезпечує утворення додаткових центрів кристалізації у вигляді тугоплавких дисперсних інтерметалідів TiAl_3 . Присутність ультрадисперсного карбиду

кремнію SiC також забезпечує збільшення кількості центрів кристалізації. Це сприяє утворенню більшої кількості рівновісних комірок α -твердого розчину на основі алюмінію. Наявність у складі KBF_4 разом з карбонатом натрію Na_2CO_3 забезпечує утворення на поверхні розплаву захисної плівки, сприяє адсорбції шлакових включень і одночасному видаленню зі сплаву водню.

Дослідження процесів руйнування при квазістатичному навантаженні проводили на вторинному сплаві АК9М2 відповідно плану багатофакторного експерименту другого порядку 2^3 . У якості незалежних змінних були прийняті: вміст стружки (1...19 %) в шихті сплаву АК9М2; вміст заліза в сплаві (0,66...2,34 %) і кількість модифікувального комплексу МК-1 (0,02...0,22 %). Плавки проводили в печі опору СНЗ-3 у чавунному футерованому тиглі під покривним флюсом (62 % NaCl, 13 % KCl, 25 % NaF). Після нагрівання до $710 \pm 5^\circ\text{C}$ розплав обробляли модифікувальним комплексом МК-1 і виготовляли з нього клиноподібні зливки масою 5 кг. Термообробку зразків для випробувань на розрив ($\varnothing 5\text{ мм}$, $l_0 = 25\text{ мм}$) проводили за режимом Т6 згідно ДСТУ 2839-94 (гартування $515 \pm 5^\circ\text{C}$, 6 год. та старіння $200 \pm 5^\circ\text{C}$, 2 год).

Відповідно до результатів металографічного аналізу в структурі дослідного силуміну переважали три типи включень [5, 6]:

- пластинчасті включення світло-сірого кольору – фаза β (Al_5SiFe);
- включення форми правильних багатогранників брунатного кольору – фаза α ($\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$);
- включення сірого кольору компактної форми – кристалічний Si або θ -фаза (Al_2Cu).

Типові структури силумінів, оброблених різною кількістю модифікувального комплексу МК-1 представлено на рис. 1.

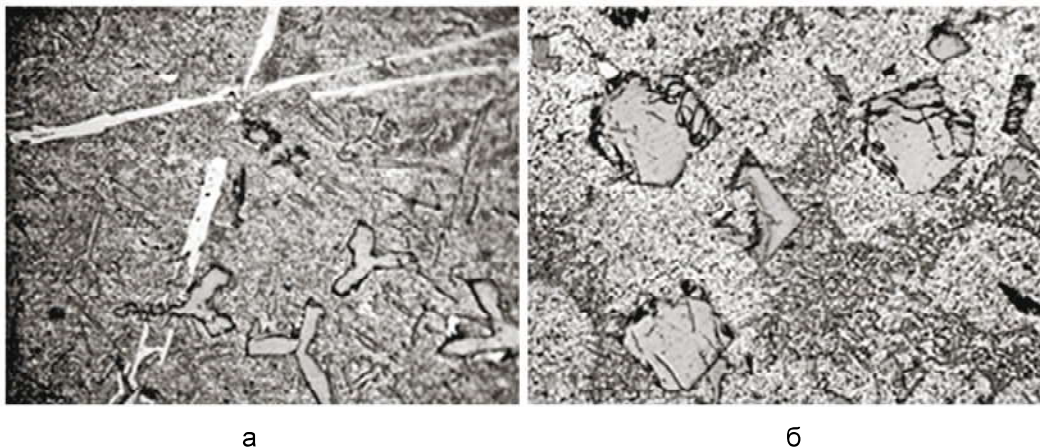


Рис. 1. Зміна морфології залізовмісних інтерметалідів в структурі сплаву АК9М2, $\times 500$. а – фаза Al_5SiFe при кількості МК-1 0,02 мас. %; б – фаза $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ при кількості МК-1 0,10...0,15 мас. %.

Наявність у складі шихти стружки помітно не вплинула на морфологію та хімічний склад інтерметалідних фаз. Найбільш значущими факторами впливу були: вміст заліза в сплаві та кількість присадки модифікувального

комплексу МК-1. З підвищенням концентрації заліза в сплаві зростали кількість і параметр форми λ (відношення максимального розміру до мінімального) β -фази (рис. 1а). Присадки до розплаву модифікувального комплексу в кількості 0,10...0,15 % призводять до зникнення β -фази та появи компактних включень α -фази (рис. 1б).

На рис. 2 наведено вплив модифікувального комплексу [6] на механічні властивості сплаву АК9М2 (при вмісті у шихті 10 % стружки) після термічної обробки за режимом Т6. Наведені залежності мають вигляд з екстремумами при оптимальному вмісті модифікувального комплексу, що дорівнював 0,10...0,15 % від маси розплаву. Підвищення міцності, пластичності та твердості пояснюється зміною морфології залізистих інтерметалідних фаз (рис. 1), зниження цих показників – ефектом перемодифікування при обробленні розплаву більшою кількістю МК-1.

Зі збільшенням у силуміні вмісту заліза від 0,66 до 2,34 % спостерігалось підвищення твердості HRB на 10...12 одиниць внаслідок збільшення кількості твердих інтерметалідних фаз. Відомо [7, 8], що фаза Al_3Fe має мікротвердість 11740 МПа, Al_2Cu – 4570 МПа, Al_3SiFe – 4440 МПа.

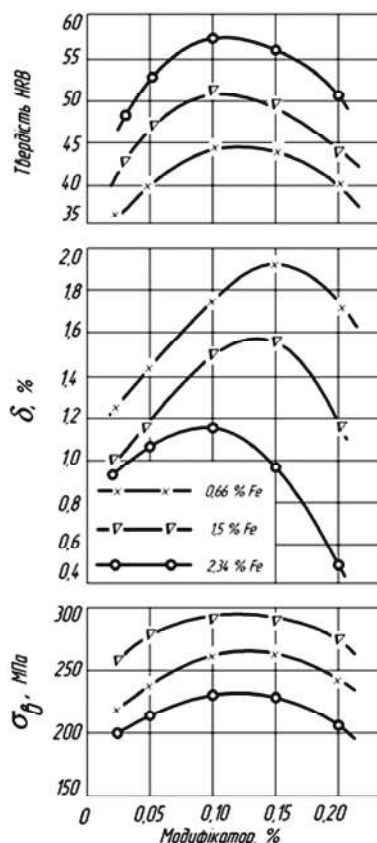


Рис. 2. Вплив модифікувального комплексу МК-1 на механічні властивості силуміну АК9М2.

Спостерігалась чітка залежність відносного видовження від вмісту заліза, зі збільшенням його концентрації у досліджуваних межах δ знижувалось від 1,9 до 0,95 %, тобто більш ніж удвічі.

Залежність границі міцності від вмісту заліза характеризувалася максимумом при 1,5 % Fe [6]. Як видно з рис. 2 найнижчі значення σ_B мали силуміни з 2,34 % Fe, найбільші – з 1,5 % Fe; силуміни з 0,66 % Fe займають проміжне положення. Отримані результати пояснюються тим, що зі збільшенням вмісту заліза до 1,5 % збільшувалась кількість інтерметалідних фаз, що відігравали роль бар'єрів для руху дислокацій і таким чином сприяли зміцненню металевої основи силуміну. При більш високому вмісті заліза формувалася практично замкнена сітка з інтерметалідів, що призводило до окрихчення сплаву (рис. 2) та до зниження границі міцності.

Об'єктом досліджень руйнування при циклічних навантаженнях слугував вторинний силумін АК8МЗ, виплавлений за наведеною технологією та термооброблений за режимом: гартування при температурі 500 ± 10 °C та старіння при температурі 180 ± 10 °C

протягом 8 год. Модифікування сплаву виконувалось при температурі 710 °С комплексним модифікатором [9]. Металографічний кількісний та якісний аналіз сплаву проводився на мікроскопі «НЕОРТ-8», випробування на малоциклову втому на установці ІП-2 на плоских зразках повторно-змінним вигином (деформація зразків $\varepsilon=0,3\%$).

Фрактографічні дослідження зламів зразків після випробувань на втому проводились на електронному мікроскопі. З метою дослідження мікромеханізму зародження та розповсюдження мікротріщин від утомленості робочу поверхню зразків (у зоні руйнування) полірували. На рис. 3 наведені мікрознімки тріщиноутворення у немодифікованому та модифікованому сплавах.

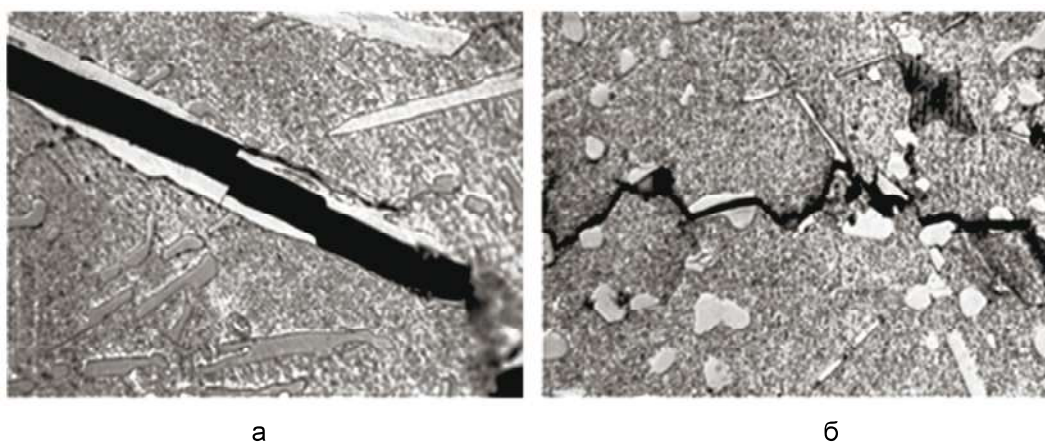


Рис. 3. Розповсюдження мікротріщин втоми у немодифікованому (а) та модифікованому (б) сплаві АК8МЗ. $\times 500$.

За наявності у мікроструктурі сплаву пластинчастих включень β -фази перші мікротріщини з'являлися через 200...300 циклів навантаження у результаті розшарування β -фази та переходу мікротріщин у металеву основу. При відсутності у структурі сплаву крупних пластин β -фази тріщина проходила через включення α -фази, кремнію та θ -фази, зазвичай, огинаючи та зрідка руйнуючи включення. На відміну від прямолінійних мікротріщин, що утворювались β -фазою, α -фаза сприяла утворенню звивистих мікротріщин, що свідчить про більш високу енергоємність руйнування у другому випадку.

Результати досліджень на малоциклову втому показали наявність чіткого зв'язку між морфологією інтерметалідних фаз та опором втомі сплаву АК8МЗ. Були розраховані коефіцієнти кореляції для загального параметра форми $\lambda_{\text{заг}}$ та параметра форми β -фази λ_{β} . Максимальний коефіцієнт кореляції (-0,97) отримано між параметром форми β -фази λ_{β} та числом циклів до руйнування N . Це свідчить про те, що серед мікроструктурних складових сплаву АК8МЗ максимальний вплив на характеристики втоми сплаву чинить інтерметалідна залізомістка β -фаза. На рис.4 графічно наведена залежність опору втомі від параметра форми β -фази λ_{β} .

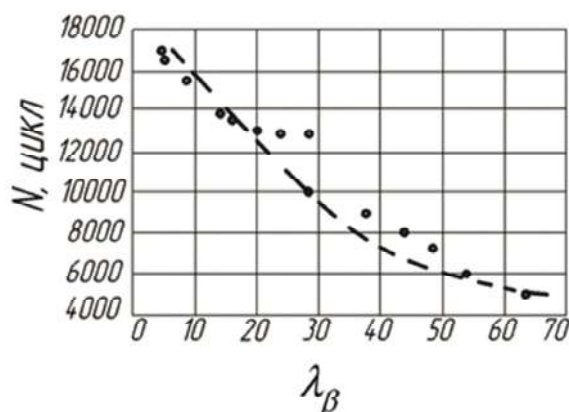


Рис. 4. Залежність опору втомі сплаву АК8МЗ від параметра форми β -фази λ_β .

Застосування комплексного модифікатора призвело не тільки до трансформації β -фази в α -фазу, але й до подрібнення інших структурних складових, до зниження у силумінах вмісту водню та зменшенню пористості до 1 балу.

Висновки

1. Досліджено вплив комплексного модифікування на механічні та службові властивості вторинних силумінів, отриманих з використанням низькоякісної шихти. Встановлено можливість у результаті рафінування та модифікування рідкого металу підвищення механічних властивостей вторинних силумінів до рівня вимог ДСТУ 2839-94.

2. Досліджено процеси руйнування вторинних силумінів. Запропоновано процеси комплексного модифікування, що забезпечують підвищення опору руйнуванню при квазістатичних та циклічних навантаженнях, підвищення механічних та службових властивостей силумінів, отриманих з низькосортної шихти.

Література

1. Чернега Д. Ф., Богушевський В. С., Готвянський Ю. А. та ін Основи металургійного виробництва металів та сплавів: підручник. – К.: Вища школа, 2006. – 503 с.
2. Мітяєв О. А. Науково технологічні основи формування структури, фізико-механічних і службових властивостей вторинних силумінів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 / Мітяєв Олександр Анатолійович. – Запоріжжя, 2008. – 285 с.
3. Патент № 46094 Україна. МПК C22C/00. Модифікувальний комплекс для алюмінієвих сплавів / Лоза К. М., Мітяєв О. А., Волчок І. П. – №u200905914; заявл. 09.06.2009; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23/2009, 4 с.
4. Немененок Б. М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов. – Мн.: Технопринт, 1999. – 272 с.
5. Островская А. Е., Волчок И. П. Влияние интерметаллидных фаз на сопротивление разрушению алюминиевых сплавов // Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 34. – С. 211-214.

6. Лютова О. В. Підвищення технологічних та механічних властивостей до евтектичних вторинних силумінів: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.01 / Лютова Ольга Валеріївна. – Запоріжжя, 2012. – 17 с.
7. Бондарев, А. А., Попович А. П., Чернов В. Ю. Восстановление алюминиевых поршней электроннолучевой сваркой // Автоматическая сварка. – 1988. – №3 (420). – С. 49-51.
8. Широкобокова, Н. В. Поверхневе зміцнення вторинних силумінів методом лазерної обробки: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.01 / Широкобокова Наталія Вікторівна. – Запоріжжя, 2013. – 19 с.
9. Патент № 42653 Україна. МПК С22С 1/00. Модифікатор для алюмінієвих сплавів / Волчок І. П., Мітяєв О. А, Островська А. Є., Скуйбіда О. Л. – №u200902454; заявл. 19.03.2009; опубл. 10.07.2009, Бюл. №13/2009, 4 с.

References

1. Cherneha D. F., Bohushevskiy V. S. , Hotvianskiy Yu. A. *Osnovy metalurhiinoho vyrobnytstva metaliv ta splaviv: pidruchnyk* (Fundamentals of metallurgical production of metals and alloys), Kyiv, Vyshcha shkola, 2006, 503 p. [in Ukrainian].
2. Mitiaiev, O. A. *Naukovo tekhnolohichni osnovy formuvannia struktury, fizyko-mekhanichnykh i sluzhbovykh vlastyvostei vtorynnykh syluminiv* (Scientific and technological fundamentals of forming of structure, physical, mechanical and service properties of secondary silumines) Doctor's thesis. Zaporizhzhia: ZNTU, 2008, 285 p. [in Ukrainian].
3. Patent No. 46094 Ukraine. MPK S22S/00. *Modyfikovalnyi kompleks dlia aliuminiievyykh splaviv* [Modification complex for aluminum alloys], Loza K. M., Mitiaiev O. A., Volchok I. P., No. u200905914; zaiavl. 09.06.2009; opubl. 10.12.2009, Biul. No. 23/2009, 4 p. [in Ukrainian].
4. Nemenenok, B. M. *Teoriya i praktika kompleksnogo modifitsirovaniya siluminov* [Theory and practice of complex modification of silumines], Minsk, Tekhnoprint, 1999, 272 p. [in Russian].
5. Ostrovskaya, A. E., Volchok I. P., *Visnyk DNUZT im. akad. V. Lazariana*, 2010, Vol. 34, pp. 211-214. [in Russian].
6. Liutova, O.V. *Pidvyshchennia tekhnolohichnykh ta mekhanichnykh vlastyvostei do evtektichnykh vtorynnykh syluminiv* [Improvement of technological and mechanical properties of hypoeutectic secondary silumines], Candidate's thesis. Zaporizhzhia: ZNTU, 2012, 12 p. [in Ukrainian].
7. Bondarev, A. A., Popovich, A. P., Chernov , V. Yu., *Avtomaticheskaya svarka*, 1988, No. 3 (420), pp. 49-51. [in Russian].
8. Shyrokobokova, N.V. *Poverkhneve zmitsnennia vtorynnykh syluminiv metodom lazernoi obrobky* [Surface strengthening of secondary silumines by laser treatment]. Extended abstract of candidate's thesis. Zaporizhzhia: ZNTU, 2013, 19 p. [in Ukrainian].

9. Patent No. 42653 Ukraine. MPK S22S 1/00. *Modyfikator dlia aliuminiievvykh splaviv* [Aluminum alloy modifier], Volchok I.P., Mitiaiev O.A, Ostrovska A Ye., Skuibida O.L, No. u200902454; zaiavl. 19.03.2009; opubl. 10.07.2009, Biul No.13/2009, 4 p. [in Ukrainian].

Одержано 19.03.20

I. P. Volchok, A. A. Mityatev, A. V. Liutova, A. A. Krulikovska, T. V. Vanarha

Increasing of the secondary silumins fracture resistance

Summary

The purpose of the work was to analyze the influence of complex refining and modifying treatment on the microstructure, fracture resistance, physical-mechanical and service properties of secondary silumines. The material of this study were the AK9M2 and AK8M3 silumines, which were obtained from low-grade charge. It is shown that increasing of secondary materials proportion in the charge the alloy structure becomes not ordered and differentiated, with increasing of intermetallic phases number having unfavorable shapes, big sizes and irregular distribution.

The analysis of alloy fracture micromechanisms showed that in conditions of static tensile, low and high cycle fatigue the Al₅SiFe phase, which has a monoclinic lattice and large sizes, is largest contributor to the fracture processes. The tendency of the Al₅SiFe phase under static and cyclic loads to delamination and formation of microcracks in it, which pass into the metal substrate, is established.

In order to effectively improve the quality of secondary silumin and to provide the required level of mechanical, technological and operational properties, a research refining and modification complex was developed. The conducted researches showed the high efficiency of the worked out refining and modifying complex, which allowed to significantly improve the microstructure of the test alloys, to increase the level of physical and mechanical properties and the resistance to fracture. The scientific novelty is the establishment and scientific substantiation of the technological bases of formation of microstructure, physical-mechanical and service properties of secondary silumines. The practical importance of the work lies in the proposed improvement of technological processes, which due to the highly efficient refining and modifying complexes provides a significant increasing in the fracture resistance, physical, mechanical and service properties of silumines obtained from low-grade charge.

Keywords: secondary silumin; microstructure; intermetallic phases; modifying processing; charge; fracture resistance; mechanical properties.