



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-64-72>
УДК 621.745.55

Поступила 28.08.2025
Received 08.08.2025

ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ АК9 МИКРОДОБАВКАМИ РЗМ

*A. T. ВОЛОЧКО, М. С. КОВАЛЬКО, Д. С. ФЕДОРОВИЧ, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: dmitry48497@yandex.by
ЧЖАН ЧЖИБО, ДУНФУ СУН, Институт новых материалов Академии наук провинции Гуандун*

В работе представлены результаты исследований по повышению механических свойств литьевого алюминиевого сплава АК9 за счет модифицирования обработкой комплексного модификатора в виде лигатуры Al – 8% Sr – 10% (La + Ce). Установлено, что введение редкоземельных элементов (La, Ce) и Sr способствует измельчению всех основных составляющих структуры, повышению твердости, предела прочности и пластичности, особенно в сплавах с повышенным содержанием железа. Показано, что применение предлагаемого подхода позволяет расширить использование вторичных алюминиевых сплавов в изделиях ответственного назначения в машиностроении.

Ключевые слова. Модификация, алюминиевые сплавы, АК9, силумины, механические свойства, повышение прочности.
Для цитирования. Волочко, А. Т. Повышение механических свойств алюминиевых сплавов АК9 микродобавками РЗМ / А. Т. Волочко, М. С. Ковалько, Д. С. Федорович, Чжан Чжибо, Дунфу Сун // Литье и металлургия. 2025. № 4. С. 64–72. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-64-72>.

IMPROVEMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF AK9 ALUMINUM ALLOYS THROUGH RARE-EARTH MICROADDITIONS

*A. T. VOLOCHKO, M. S. KOVALKO, D. S. FEDOROVICH, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Kuprevicha str. E-mail: dmitry48497@yandex.by
ZHANG ZHIBO, DONGFU SONG, Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences*

The article presents research results on enhancing the mechanical properties of the cast aluminum alloy AK9 by modification with a complex modifier in the form of an Al – 8% Sr – 10% (La + Ce) master alloy. It has been established that the introduction of rare-earth elements (La, Ce) and Sr contributes to the refinement of all major structural constituents, increasing hardness, tensile strength, and ductility, especially in alloys with elevated iron content. The study demonstrates that the proposed approach expands the application of secondary aluminum alloys in critical engineering components.

Keywords. Modification, aluminum alloys, AK9, silumins, mechanical properties, strength enhancement.

For citation. Volochko A. T., Kovalko M. S., Fedorovich D. S., Zhang Zhibo, Dongfu Song. Improvement of mechanical properties of AK9 aluminum alloys through rare-earth microadditions. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 4, pp. 64–72. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-64-72>.

Современное развитие машиностроения, авиастроения, электротранспорта и других отраслей техники предъявляет повышенные требования к конструкционным материалам. Алюминиевые сплавы благодаря сочетанию легкости, коррозионной стойкости и теплопроводности находят широкое применение в промышленности. Среди них особое внимание уделяется литьевым сплавам – силуминам. Наибольшее распространение получили сплавы системы Al–Si–Mg (АК9 и АК9ч), обладающие хорошими литьевыми свойствами и достаточными механическими свойствами, что делает их востребованными при создании корпусных элементов деталей двигателестроения и других компонентов [1].

Оба сплава регулируются ГОСТ 1583-93, и ключевым отличием является содержание примесей, в частности железа (табл. 1). Ввиду этого сплав АК9ч обладает большей пластичностью, но меньшими прочностными характеристиками.

Сплав АК9ч демонстрирует высокую герметичность отливок, устойчивость к агрессивным средам, однако в то же время требует строгого контроля газонасыщения, сложной термообработки, а также использования первичных шихтовых материалов, что существенно повышает его себестоимость. Наличие достаточно большого количества в сплаве АК9 примесей (табл. 1), в первую очередь железа, огрубляет микроструктуру, влияет на механические свойства и снижает коррозионную стойкость [2, 3].

Таблица 1. Химический состав и механические свойства сплавов АК9 и АК9ч по ГОСТ 1583-93

Сплав	Зарубежные аналоги	Содержание элементов, мас. %									Механические свойства		
		Fe	Si	Mn	Ni	Al	Cu	Mg	Zn	примеси	предел прочности (σ_b), МПа	тврдость HB	относительное удлинение (δ), %
АК9	A03600; EN AC-43400; AC4A; GAISi9Mg	до 1,3	8,0– 11,0	0,2– 0,5	до 0,3	85,1– 91,6	до 1,0	0,2– 0,4	до 0,5	всего 3,0	157–245	60–90	0,5–1,0
АК9ч	AlSi10Mg; EN AC-43500; ADC3; GK-AlSi10Mgwa	до 1,0	8,0– 10,5	0,2– 0,5	до 0,1	86,94– 91,63	до 0,3	0,17– 0,3	до 0,3	всего 1,5	147–225	50–70	1,5–3,0

Модицирование алюминиевых сплавов представляет собой актуальное направление исследований, цель которого – устранение этих ограничений.

Для модицирования силуминов используемые добавки условно разделяются в зависимости от воздействия на отдельные элементы структуры. Так, добавки Ti, B, Ta, Zr, V, Mo и другие преимущественно модицируют зернистую структуру, могут изменять форму дендритов. Элементы Sr, Na, Sb, Bi, Li модицируют эвтектику силуминов. Ряд элементов P, Se, I, Nb и другие изменяют размеры и форму β -Si кристаллов в сплаве и тем самым способствуют повышению физико-механических и трибологических свойств [4]. Модицирующие элементы могут вводиться в виде флюсовых композиций, порошков, в том числе в струе инертного газа, в виде лигатур-модификаторов, представляющих промежуточные сплавы. Интерес исследователей и металлургов вызывают модификаторы, оказывающие комплексное воздействие на отдельные элементы структуры, обеспечивающие возможность дисперсного упрочнения. Глобулизация (сфериодизация) железосодержащих фаз использованием традиционного модификатора силуминов типа Al-5Ti-B не приводит к значительным изменениям структуры, это же прослеживается и при добавлении Sr и Ce [5].

К числу путей повышения конструкционной прочности силуминов следует отнести обработку лигатурами-модификаторами, содержащими натриевые соли фосфорных кислот, интерметаллиды с неравновесной квазикристаллической структурой, аморфный стеклоуглерод [6–10]. Такие микродобавки позволяют повысить не только прочностные характеристики, но и пластичность литьих заготовок, что открывает путь для их последующего формообразования. Так, обработка давлением литьих заготовок повышает конструкционную прочность силуминов, что позволяет применять их взамен железоуглеродистых сплавов [11]. При этом снижается масса деталей, их инерционность при одновременном повышении эксплуатационных характеристик.

Модицирующее действие наноразмерных керамических частиц оксидов SiO_2 , Al_2O_3 , нитрида бора BN проявляется в измельчении эвтектической составляющей силуминов, что, вероятно, связано с изменением переохлаждения фронта кристаллизации [12]. Действие таких частиц позволяет снизить до 25–30 % содержание водорода в расплаве и повысить механические свойства на 10–50 %. Для комплексного воздействия таких керамических частиц предложен способ получения модификаторов, при котором химико-термической обработкой на их поверхности осаждались элементы Ti и B. Эти элементы эффективно действуют на размер α -Al силуминов. Для ввода и равномерного распределения в расплаве керамических частиц с таким покрытием использовали лигатуры-модификаторы, которые получали методом горячей экструзии смеси порошков [13].

В последние годы тенденцией стало введение редкоземельных элементов (РЗМ) типа La, Sc, Ce и др., которые также оказывают комплексное воздействие как на измельчение зернистой структуры α -Al, так и на модицирование эвтектического кремния [14]. При этом усиление комплексного воздействия РЗМ на микроструктуру силуминов может оказывать Sr. В этом случае микродобавки стронция модицируют кремний, а РЗМ подавляют рост дендритов. Оптимальное количество РЗМ создает множество гетерогенных центров кристаллизации при зарождении первичной α -Al фазы, что способствует измельчению структуры. Особо следует подчеркнуть, что синергетическое влияние РЗМ и стронция [14] может проявляться и при воздействии на интерметаллиды, в том числе железосодержащие фазы, изменяя морфологию (повысив их сферичность). Эквивалентный диаметр богатых железосодержащих фаз увеличивается до 12–13 % в сравнении с обработкой силуминов традиционным модификатором Al-5Ti-1B,

что одновременно повышает прочностные и пластические характеристики, открывает возможность более широкого использования вторичных алюминиевых сплавов, загрязненных Fe, для производства деталей ответственного машиностроения.

Целью работы является повышение конструкционной прочности силуминов путем модифицирования РЗМ и для широкого вовлечения вторичных ресурсов при получении ответственных изделий силовых агрегатов машиностроения. Для достижения поставленной цели требовалось определить:

- оптимальное количество комплексного модификатора, содержащего Sr, La, Ce, при различных условиях приготовления расплава (индукционного и электронагревом) на свойства материалов;
- влияние микролегирования РЗМ в составе лигатур на механические свойства сплава АК9 с разным содержанием вредных примесей железа;
- влияние скорости кристаллизации на свойства сплава;
- термическую стабильность сохранения эффекта модифицирования.

Материалы и методы исследований

Исследование влияния модифицирования проводили на силумине типа АК9 – Al–0,3Cu–0,33Mn–9Si–0,22Mg при различном содержании Fe. В качестве комплексного модификатора (КМ) использовали лигатуру на основе алюминия – Al–8 мас. % Sr–10 мас. % (La + Ce).

Плавку образцов вели в индукционной тигельной печи ИСВ 0,04 в графито-шамотных тиглях с возможностью последующей выдержки расплава в электропечи сопротивления (рис. 1). Модифицирование производили как перед непосредственной разливкой расплава в формы после индукционной плавки, так и перед выдержкой расплава в электропечи сопротивления. Для получения экспериментальных образцов отливок алюминиевых сплавов использовали металлические и песчаные формы. Литье в металлические формы осуществляли как при комнатной температуре, так и при подогреве до 200 °C.

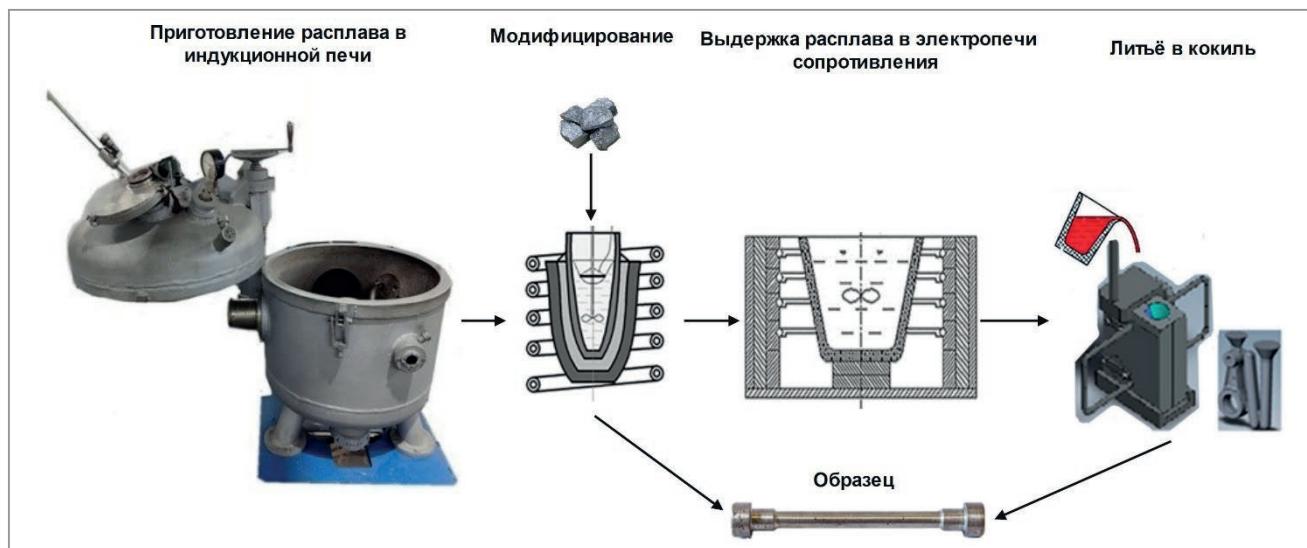


Рис. 1. Схема получения модифицированных отливок из алюминиевых сплавов

Микроструктурные исследования проводили с использованием металлографического комплекса МИКРО 200. Фазовый состав определяли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М в Cu- и СоКα-излучениях в режиме сканирования (по точкам) с шагом 0,1° в интервале углов рассеяния $2\theta = 20\text{--}60^\circ$. Продолжительность набора импульсов в точке составляла 30 с. Распределение структурных элементов и элементный состав определяли с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira 3.

Исследования механических свойств образцов проводили с использованием разрывной машины WDW-100E, а также твердомера ТШ-2М в соответствии с ГОСТ 1497-84 и 9012-59.

Результаты и их обсуждение

На первоначальном этапе проводили опытные плавки силумина, содержащего 1,3 мас. % Fe, обработанного различным количеством КМ. Литые заготовки получали как после индукционной плавки, так и с последующей изотермической выдержкой в электропечи сопротивления при 820 ± 10 °C в течение

0,5 ч. Такого рода сравнительные исследования продиктованы сложившейся практикой в производстве алюминиевого литья, когда металл сначала расплавляется в индукционных печах большей емкости, а затем переливается в раздаточные печи [4].

Исследования модифицированных сплавов показали, что для заметного повышения их свойств минимальное количество КМ составляет 0,1–0,2 мас. %. В этом случае наблюдается повышение твердости на 11–13 % (рис. 2).

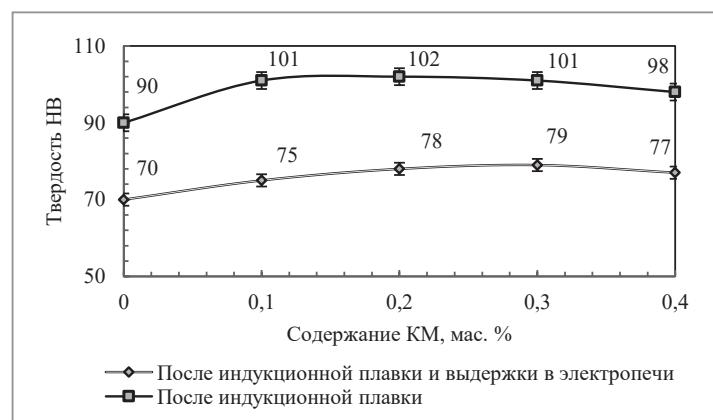


Рис. 2. Изменение твердости сплавов AK9 после ввода различного количества КМ при индукционной плавке и при последующей выдержке в электропечи сопротивления в течение 0,5 ч

Следует отметить, что более высокий уровень свойств характерен для образцов, полученных непосредственно после индукционной плавки. Вместе с тем тенденция такого рода модифицирования сохраняется и после изотермической выдержки в электропечи сопротивления в течение 0,5 ч.

Весьма интересно оценить влияние КМ на свойства силуминов, содержащих различное количество Fe. Для этого приготовили образцы алюминиевого сплава, содержащего 0,4 и 1,3 мас. % Fe, что по ГОСТ 1583-93 соответствует сплавам AK9ч и AK9. После индукционной плавки сплавы подвергали модифицированию и изотермической выдержке при 800–820 °C в течение 0,5 ч. Результаты измерений твердости образцов (рис. 3) показали, что эффект модифицирования более ощутим при повышенном содержании железа (1,3 мас. %).

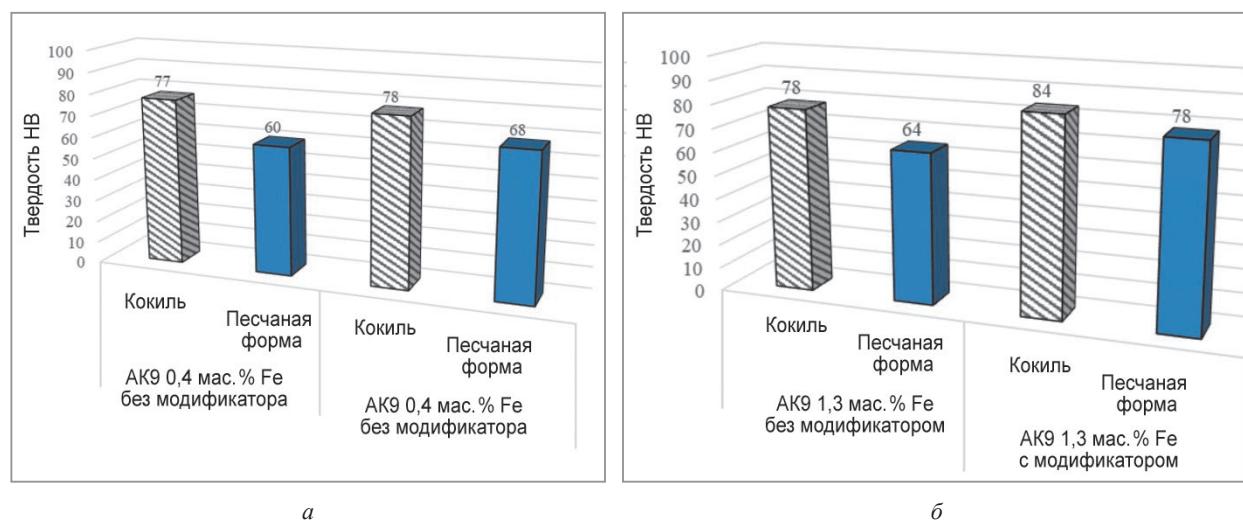


Рис. 3. Сравнительные результаты исследований твердости (HB) сплава AK9ч с содержанием 0,4 мас. % Fe (а) и AK9 с 1,3 мас. % Fe (б)

Так, твердость модифицированных образцов при литье в песчаную форму составляет 78 HB, а при литье в кокиль – 84 HB. Это позволяет говорить об эффективности действия КМ для вторичных (более загрязненных) силуминов.

Результаты сравнительных исследований показывают, что модифицирование сплавов AK9ч и AK9 при литье в песчаную форму значительно увеличивает твердость (на 13–21 %), тогда как при кокильном литье этот эффект менее выражен.

Важно было оценить возможности реализации процесса модифицирования для различных технологий литья как при невысоких скоростях кристаллизации (к примеру, при литье в песчаные формы), так и при повышенных (30–50 °C/c, при литье в металлический кокиль). Для получения заготовок при более высоких скоростях кристаллизации (150–750 °C/c) использовали разъемный медный клиновидный кокиль [4], в котором твердость фиксировалась по высоте клина. С повышением скорости кристаллизации происходит рост твердости образцов на 11–17%. Этот эффект одинаково проявляется и в модифицированном, и в немодифицированном сплаве. При этом на всем интервале скоростей кристаллизации сохраняется более высокая твердость у модифицированного сплава AK9 (рис. 4).

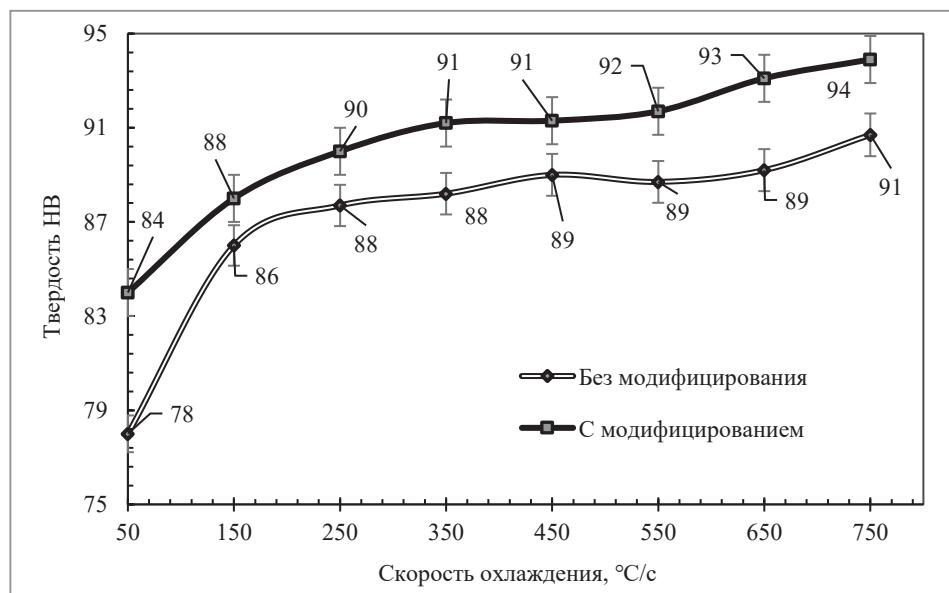


Рис. 4. Влияние скорости кристаллизации и модифицирования на изменение твердости в сплаве с 1,3 мас. % Fe при литье в медную клиновидную форму

Немаловажным фактором для достижения высоких свойств при модифицировании в производственных условиях является время выдержки расплава. Исследование данного параметра на твердость, предел прочности и относительное удлинение для образцов с содержанием 1,3 мас. % Fe показало, что эффект модифицирования сохраняется вплоть до 2,5 ч (рис. 5). Это позволяет использовать модификатор в производственных условиях, где расплав после приготовления в индукционной печи переливается и выдерживается в печи для хранения и выдачи металла. Литье производили в подогретый до 200 °C кокиль. Это в наибольшей степени повторяет процесс получения отливок при непрерывном производстве.

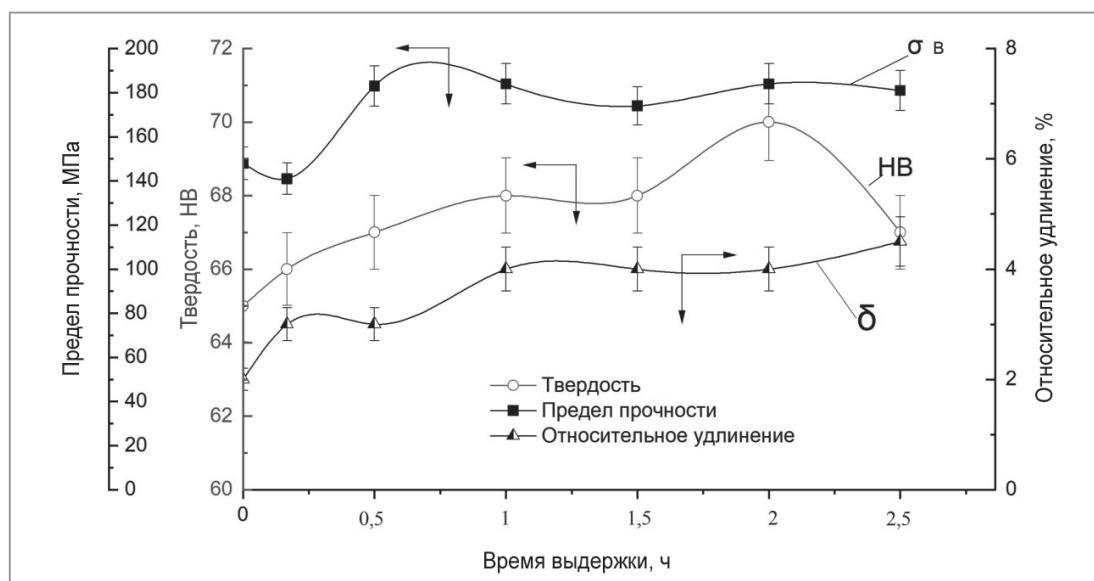


Рис. 5. Изменение механических свойств сплава AK9, содержащего 1,3 мас. % Fe в зависимости от времени выдержки

Приведенные результаты согласуются с металлографическими исследованиями. Модифицирование АК9 добавками КМ приводит к более равномерной кристаллизации α -фазы, а также к ее диспергированию в 5–8 раз (рис. 6).

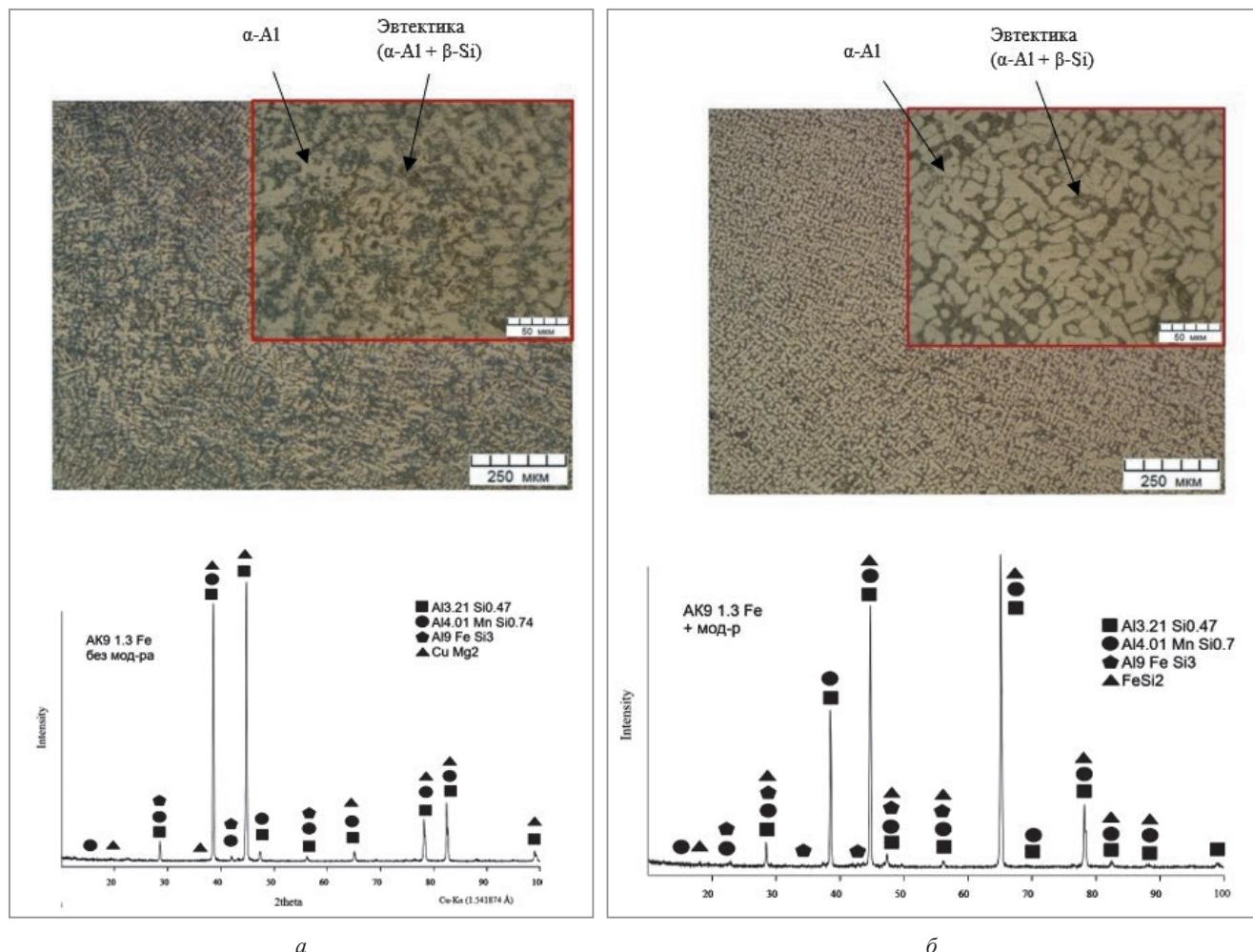


Рис. 6. Микроструктура и фазовый состав сплава с 1,3 мас. % Fe до (a) и после (б) модификации

Сравнительный рентгеноструктурный фазовый анализ в совокупности с рентгеноспектральным анализом и картой распределения основных химических элементов в образцах без обработки и с обработкой КМ показал наличие схожего набора основных и вторичных фаз. В обоих случаях основной фазой является алюминиево-кремниевая эвтектика $\text{Al}_{3.21}\text{Si}_{0.47}$, что соответствует базовой структуре сплава АК9 и обеспечивает его литейные свойства.

В обоих образцах также обнаружена β -фаза Al_9FeSi_3 , представляющая собой игольчатый интерметаллид железа, традиционно считающийся вредным из-за своей склонности к инициированию трещин и снижению пластичности сплава.

Особый интерес представляет фаза $\text{Al}_{4.01}\text{MnSi}_{0.74}$, идентифицированная в обоих образцах. На основании совпадения пиков, типичной морфологии и литературных данных она с высокой долей вероятности соответствует α -фазе $\text{Al}_{15}(\text{Mn, Fe})_3\text{Si}_2$ (рис. 7). Эта фаза формируется при введении марганца в сплав и способствует превращению вредной β -фазы Al_9FeSi_3 в более компактную и менее хрупкую структуру. Замещение марганца железом в кристаллической решетке α -фазы типично для данной системы и подтверждается сдвигами дифракционных пиков.

Сравнительные исследования механических свойств сплавов типа АК9 (рис. 8) при литье в условиях, близких к производственным, показывают перспективность использования КМ для увеличения комплекса прочности и пластичности, особенно в случае сплавов с повышенным содержанием Fe. Значения относительного удлинения возрастают на 125%, а предела прочности – на 25%. При достаточно высокой пластичности литые модифицированные сплавы АК9 могут подвергаться и пластической деформации [14].

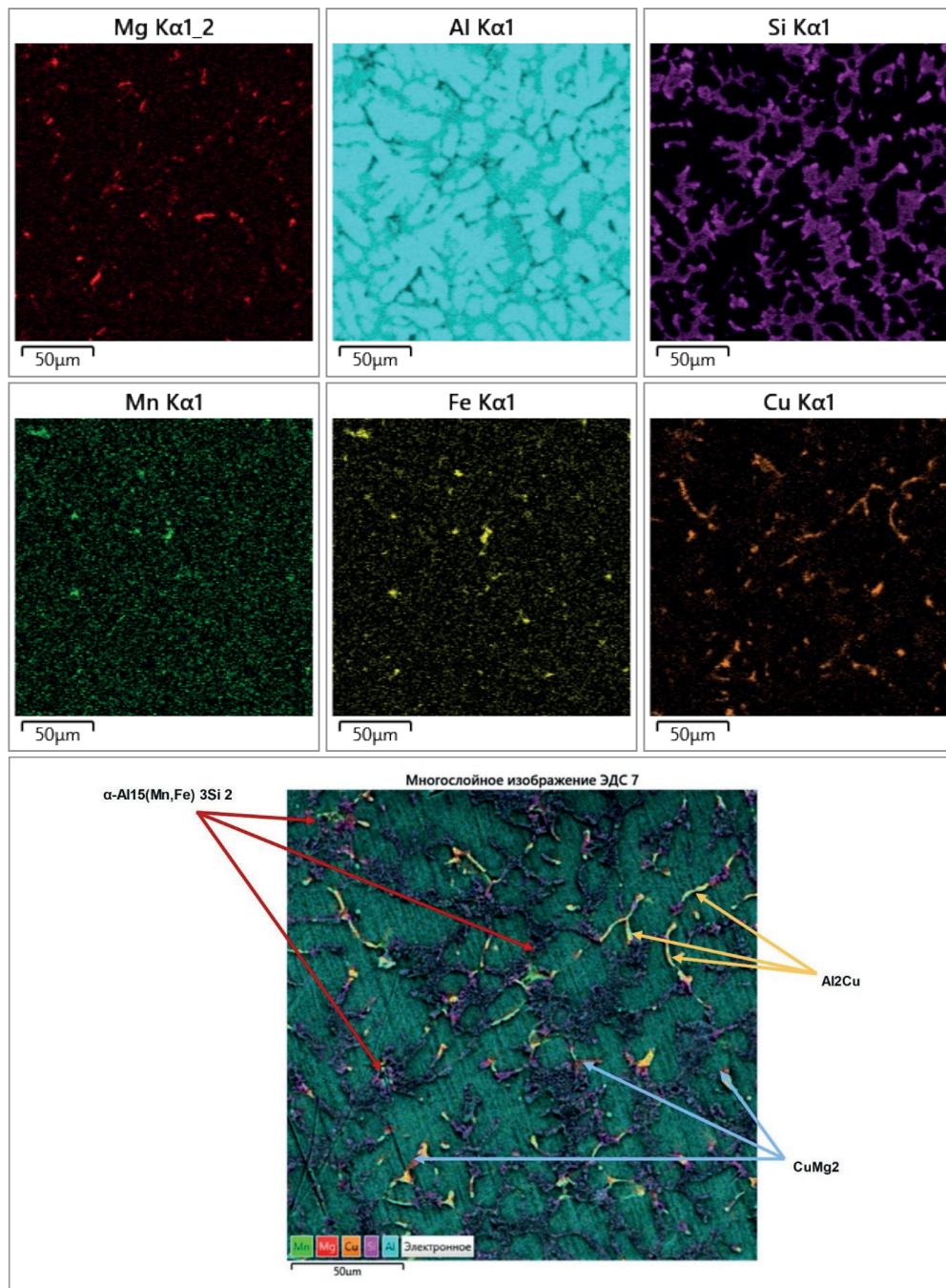


Рис. 7. Карта распределения элементов в сплаве АК9 после модифицирования

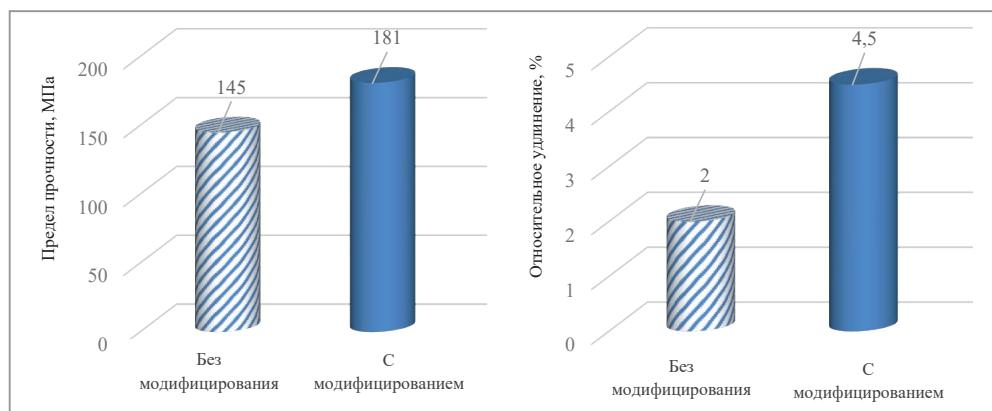


Рис. 8. Сравнительные показатели предела прочности, относительного удлинения и твердости для образцов до и после модифицирования

Выводы

- Проведенные исследования модифицирования алюминиевого сплава АК9 комплексным модификатором, содержащим Sr и редкоземельные металлы (La, Ce), позволили значительно повысить предел прочности материала σ_b (на 25 %) при одновременном повышении пластических свойств (δ) на 125 %.
- Введение КМ способствует значительному измельчению α -Al эвтектического кремния, а также превращению железосодержащей фазы (типа Al_9FeSi_3) в более компактную и менее хрупкую структуру.
- Установлено, что эффективность модифицирования в наибольшей степени проявляется при повышенном содержании железа (до 1,3 %), что связано с взаимодействием добавки с железосодержащими фазами.

Работа выполнена в рамках проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Т24КИТГ-015).

ЛИТЕРАТУРА

- Модифицирование литьевых алюминиевых сплавов (обзор) / В. А. Дуюнова [и др.] // Труды ВИАМ. – 2023. – № 4. – С. 136.
- Волочко, А. Т.** Переработка и использование алюминиевых отходов в производстве порошков, паст, композиционных и керамических материалов / А. Т. Волочко. – Минск: Бел. наука, 2006. – 302 с.
3. A novel modifier Al-Sr-RE for improving the microstructure and mechanical properties of recycled AA3104 alloy / Dongming Yang [et al] // Journal of Alloys and Compounds. – 2025. – Vol. 1022.
4. **Волочко, А. Т.** Алюминий: технологии и оборудование для получения литьих изделий / А. Т. Волочко, М. А. Садоха. – Минск: Бел. наука, 2011. – 387 с.
5. **Волочко, А. Т.** Формирование структуры и свойств композитов, полученных при обработке алюминиевого расплава лигатурами, содержащими стеклоподобные углеродные частицы / А. Т. Волочко, А. А. Шегидевич, Д. В. Куис // Композиты и nanoструктуры. – 2014. – Т. 6, № 2. – С. 2–13.
6. Анализ структурообразования силуминов / А. Т. Волочко, С. П. Королев, А. М. Галушко [и др.] // Вестн НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2013. – № 3. – С. 18–25.
7. Наномодифицированный композиционный материал на основе алюминия / Д. В. Куис, Н. А. Свидунович, А. Т. Волочко [и др.] // Вестник Карагандинского государственного индустриального университета. – 2013. – № 2. – С. 55–60.
8. Композит: алюминиевая матрица, армированная квазикристаллическими частицами Al–Cu–Fe, структура и свойства / А. Т. Волочко, А. А. Шегидевич, Ю. В. Мильман [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2014. – Т. 2. – С. 426–435.
9. **Волочко, А. Т.** Исследование свойств композитов на основе алюминий-кремниевого сплава и наноструктурированного углерода / А. Т. Волочко, А. А. Шегидевич // Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-техн. конф. – Брянск, 2014. – Вып.19. – С. 31–35.
10. **Волочко, А. Т.** Прочность и износостойкость шатунов из композита на основе алюминия и стали / А. Т. Волочко, А. А. Шегидевич // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – № 3. – С. 17–21.
11. **Сомов, А. И.** Эвтектические композиции / А. И. Сомов, М. Л. Тихоновский. – М.: Металлургия, 1975. 304 с.
12. **Волочко, А. Т.** Комплексная обработка силуминов дисперсными частицами и атомарным азотом / А. Т. Волочко, А. Ю. Изобелло, В. В. Овчинников // Литье и металлургия. – 2009. – № 3. – С. 218–226.
13. The Influence of the Combined Addition of La-Ce Mixed Rare Earths and Sr on the Microstructure and Mechanical Properties of AlSi10MnMg Alloy / Yu Liu, Zhichao Yu, Man Zhang [et al.] // Metals. – 2024. – Vol. 14.
14. **Шегидевич, А. А.** Материалы на основе силуминов с повышенной пластичностью для изготовления ответственных деталей машиностроения: дис. ... канд. техн. наук / А. А. Шегидевич. – М., 2015. – 205 с.

REFERENCES

1. **Duyunova V.A. et al.** Modifitsirovaniye lityeynykh aliuminievikh splavov (obzor) [Modification of cast aluminum alloys (review)]. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*, 2023, no. 4, 136 p.
2. **Volochko A. T.** Pererabotka i ispol'zovaniye aliuminievikh otkhodov v proizvodstve poroshkov, past, kompozitsionnykh i keramicheskikh materialov [Recycling and use of aluminum waste in the production of powders, pastes, composite and ceramic materials]. Minsk, Bel. nauka Publ., 2006, 302 p.
3. **Dongming Yang et al.** A novel modifier Al-Sr-RE for improving the microstructure and mechanical properties of recycled AA3104 alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, vol. 1022.
4. **Volochko A. T., Sadokha M. A.** Aluminii: tekhnologii i oborudovaniye dlya polucheniya litikh izdeliy [Aluminum: technologies and equipment for producing cast products]. Minsk, Bel. nauka Publ., 2011, 387 p.
5. **Volochko A. T., Shegidevich A. A., Kuis D. V.** Formirovaniye struktury i svoistv kompozitov, poluchennykh pri obrabotke aliuminievogo rasplava ligaturami, soderzhashchimi steklopodobnye uglerodnye chastitsy [Formation of the structure and properties of composites obtained by treating aluminum melt with master alloys containing glass-like carbon particles]. *Kompozity i nanostruktury = Composites and Nanostructures*, 2014, vol. 6, no. 2, pp. 2–13.
6. **Volochko A. T., Korolev S. P., Galushko A. M.** [et al.] Analiz strukturoobrazovaniya siluminov [Analysis of Silumin Structure Formation]. *Vesti NAN Belarusi. Seriya fiziko-tehnicheskikh nauk = News of the National Academy of Sciences of Belarus. Series on Physical and Technical Sciences*, 2013, no. 3, pp. 18–25.

7. **Kuis D.V., Svidunovich N.A., Volochko A.T.** [et al.] Nanomodifitsirovannyi kompozitsionnyi material na osnove aliuminiya [Nanomodified aluminum-based composite material]. *Vestnik Karagandinskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta = Bulletin of the Karaganda State Industrial University*, 2013, no. 2, pp. 55–60.
8. **Volochko A.T., Shegidevich A.A., Milman Yu. V.** [et al.] Kompozit: aluminievaya matritsa, armirovannaya kvazikristallicheskimi chasticsami Al–Cu–Fe, struktura i svoistva [Composite: aluminum matrix reinforced with quasicrystalline Al–Cu–Fe particles, structure and properties]. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov = Modern methods and technologies for creating and processing materials*, 2014, vol. 2, pp. 426–435.
9. **Volochko A.T., Shegidevich A.A.** Issledovanie svoistv kompozitov na osnove aliuminii-kremnievogo splava i nanostrukturirovannogo ugleroda [Study of the properties of composites based on aluminum-silicon alloy and nanostructured carbon]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii = New materials and technologies in mechanical engineering*, 2014, vol. 19, pp. 31–35.
10. **Volochko A.T., Shegidevich A.A.** Prochnost i iznosostoikost shatunov iz kompozita na osnove aliuminiya i stali [Strength and wear resistance of connecting rods made of aluminum-steel composite]. *Mekhanika mashin, mehanizmov i materialov = Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2014, no. 3, pp. 17–21.
11. **Somov A.I., Tikhonovskiy M.L.** *Evtekticheskie kompozitsii* [Eutectic compositions]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975, 304 p.
12. **Volochko A.T., Izobello A.Yu., Ovchinnikov V.V.** Kompleksnaya obrabotka siluminov dispersnymi chasticsami i atomarnym azotom [Complex processing of silumins with disperse particles and atomic nitrogen]. *Litye i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2009, no. 3, pp. 218–226.
13. **Yu Liu, Zhichao Yu, Man Zhang** [et al.] The Influence of the Combined Addition of La–Ce Mixed Rare Earths and Sr on the Microstructure and Mechanical Properties of AlSi10MnMg Alloy. *Metals*, 2024, vol. 14.
14. **Shegidevich A.A.** Materialy na osnove siluminov s povyshennoi plastichnost'yu dlya izgotovleniya otvetstvennykh detalei mashinostroeniya [Silumin-based materials with increased plasticity for the manufacture of critical mechanical engineering parts]. Moscow, 2015, 205 p.