



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-127-134>
УДК 669.715.017

Поступила 17.04.2026
Received 17.04.2026

СВОЙСТВА ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ Д16 И В95, ОБРАБОТАННЫХ ЛИГАТУРАМИ С УГЛЕРОДНЫМИ, КАРБИДНЫМИ И БОРИДНЫМИ ФАЗАМИ

А. Т. ВОЛОЧКО, М. С. КОВАЛЬКО, К. Б. ПОДБОЛОТОВ, Д. С. ФЕДОРОВИЧ,
Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Академика Купревича, 10.
E-mail: dmitry48497@yandex.by

В работе исследовано влияние углеродных, карбидных и боридных фаз на формирование структуры и механические свойства алюминиевых сплавов Д16 и В95. Упрочняющие добавки карбидов Al_4C_3 , SiC и борида AlB_{10} синтезировались на стадии механоактивации и экструдирования лигатур из смеси порошков алюминия, углерода различного структурного состояния, кремния и оксида бора. Затем алюминиевые лигатуры вводили в расплав. Полученные алюминиевые композиты исследовали в литом состоянии, а также после горячего экструдирования и термической обработки по режиму Т6. Установлено, что в литом состоянии наиболее выраженный упрочняющий эффект наблюдается в сплаве В95, обработанном лигатурой, содержащей интерметаллиды AlB_{10} , при этом прочность возрастает на 15% до 370 МПа при одновременном повышении пластичности с 5 до 7%. Для сплава Д16, обработанного этой лигатурой, предел прочности увеличивается на 35% до 291 МПа при незначительном снижении относительного удлинения с 11 до 7%. После пластической деформации и термообработки (горячая экструзия и режим Т6) материалы на основе сплава Д16 демонстрируют оптимальное сочетание высокой прочности (до 330 МПа) и повышенной пластичности (относительное удлинение более 22%). Полученные результаты подтверждают перспективность применения лигатур с дисперсными частицами для создания алюминиевых композиционных материалов с улучшенным комплексом механических свойств.

Ключевые слова. Деформируемые алюминиевые сплавы, алюминиевые композиционные материалы, дисперсное упрочнение, сплавы Д16 и В95, углеродные добавки, карбиды кремния, лигатуры, микроструктура, механические свойства.

Для цитирования. Волочко, А. Т. Свойства деформируемых алюминиевых сплавов Д16 и В95, обработанных лигатурами с углеродными, карбидными и боридными фазами / А. Т. Волочко, М. С. Ковалько, К. Б. Подболотов, Д. С. Федорович // Литие и металлургия. 2026. № 2. С. 127–134. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-127-134>.

PROPERTIES OF WROUGHT ALUMINUM ALLOYS D16 AND V95 MODIFIED WITH CARBIDE AND CARBON-BASED DISPERSED PARTICLES

A. T. VOLOCHKO, M. S. KOVALKO, K. B. PODBOLOTOV, D. S. FEDOROVICH, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Academica Kuprevicha str.
E-mail: dmitry48497@yandex.by

The study investigated the effect of carbon, carbide, and boride phases on the structure formation and mechanical properties of D16 and V95 aluminum alloys. Strengthening additives of Al_4C_3 and SiC carbides and AlB_{10} boride, were synthesized at the stage of mechanical activation and extrusion of ligatures from a mixture of aluminum powders, carbon of various structural conditions, silicon and boron oxide. The aluminum ligatures were then introduced into the melt. The obtained aluminum composites were studied in the cast state, as well as after hot extrusion and heat treatment using the T6 mode. It was found that the most expressed strengthening effect in the cast state is observed in the 7075 alloy treated with a ligature, containing AlB_{10} intermetallic compounds, with durability increasing by 15% to 370 MPa, while simultaneously increasing formability from 5 to 7%. For the 2024 alloy treated with this ligature, the tensile durability increases by 35% to 291 MPa with a slight decrease in relative elongation from 11 to 7%. After plastic deformation and heat treatment (hot extrusion and the T6 mode), materials based on the 2024 alloy demonstrate an optimal combination of high durability (up to 330 MPa) and increased formability (relative elongation over 22%). The obtained results confirm the potential of using ligatures with dispersed particles for the creation of aluminum composite materials with an improved set of mechanical properties.

Keywords: Deformable aluminum alloys, aluminum composite materials, dispersion strengthening, D16 and V95 alloys, carbon additives, silicon carbides, ligatures, microstructure, mechanical properties.

For citation. Volochko A. T., Kovalko M. S., Podbolotov K. B., Fedorovich D. S. Properties of wrought aluminum alloys D16 and V95 modified with carbide and carbon-based dispersed particles. Foundry production and metallurgy, 2026, no. 2, pp. 127–134. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-127-134>.

Введение

Деформируемые алюминиевые сплавы Д16, В95 (ГОСТ 4784-2019) относятся к высокопрочным конструкционным материалам, широко используемым в машиностроении, особенно в авиации.

Сплав Д16 (система Al–Cu–Mg) характеризуется высокими пластическими характеристиками и хорошо работает на усталость. Сплав В95 (система Al–Zn–Mg–Cu) более прочный и его применяют в условиях, где критичным параметром является предел прочности – для силовых элементов конструкций. Упрочнение этих материалов осуществляется преимущественно за счет дисперсионного твердения, обеспечивающего высокие прочностные характеристики после закалки и старения [1–3].

Вместе с тем следует отметить, что традиционные подходы к повышению механических свойств сплавов Д16 и В95 (подбор микродобавок (Zn, Li, Ag, Sc и др.) и оптимизация соотношения основных легирующих элементов) в значительной мере достигли предела своей эффективности [3].

В литом и отожженном состояниях структура данных сплавов характеризуется наличием грубых интерметаллидных фаз, локализованных преимущественно по границам зерен, что негативно влияет на их механические свойства. Даже после термомеханической обработки и оптимизированных режимов старения сохраняется проблема зернограницной сегрегации и образования обедненных зон, способствующих инициированию хрупкого разрушения.

Перспективным направлением повышения эксплуатационных характеристик деформируемых алюминиевых сплавов является формирование дисперсно-упрочненных алюминиевых композиционных материалов. Введение в алюминиевую матрицу дисперсных углеродных, нитридных, карбидных, боридных частиц позволяет оказывать комплексное воздействие на процессы кристаллизации, дислокационного упрочнения и фазообразования. Такие частицы могут выступать в роли центров кристаллизации, барьеров для движения дислокаций и модификаторов кинетики выделения упрочняющих фаз [3, 4].

При этом отмечено, что комплексное воздействие на структуру материала в наибольшей степени проявляется при уменьшении размера вводимых компонентов, что способствует образованию более дисперсных неметаллических и интерметаллидных фаз. Так, в работах [3–5] выявлено, что такие фазы могут повышать одновременно как прочностные, так и пластические свойства, что для данной группы сплавов является наиболее актуальным.

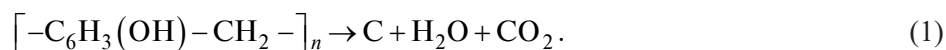
Цель настоящей работы – синтез дисперсных фаз на основе углерода (аморфный углерод), карбидов Al_4C , SiC, борида AlB_{10} на стадии получения лигатур и изучение их влияния на микроструктуру, фазовый состав и механические свойства сплавов Д16, В95 в литом, деформированном и термообработанном состояниях.

Материалы и методы исследований

Для получения алюминиевых композитов на основе сплавов В95 и Д16 использовали технологию ввода дисперсных частиц через промежуточные лигатуры, обеспечивающую высокую степень усвоения и равномерное распределение добавок в алюминиевой матрице [3].

Лигатуры изготавливали на основе порошкового алюминия марки ПА-4 с добавками углерода различного структурного состояния, карбидообразующего элемента кремния марки КР00, а также оксида бора B_2O_3 , предполагая его взаимодействие с алюминиевой матрицей. Оксид бора вводили исходя из оценки возможности синтезирования при взаимодействии с алюминием и углеродом интерметаллидных или карбидных фаз. В качестве углеродсодержащих компонентов применяли синтезированный стеклоуглерод, графеноподобный углерод и графит.

Для синтеза стеклоуглерода использовали бакелитовый лак. Составы с бакелитовым лаком подвергали пиролизу в инертной среде при температуре 600 °С (рис. 1). При этом процесс пиролиза протекает по схеме:



Формирование необходимой углеродной фазы подтверждается методом рамановской спектроскопии (рис. 1, в).

Для исследований был использован также наноструктурированный графитоподобный углерод, характеризующийся аморфной чешуйчатой структурой с развитой поверхностью, который был получен методом экзотермического взаимодействия в органосолевой смеси на основе полисахаридов и нитрата аммония [6].

Лигатуры готовили на основе составов, приведенных в таблице. Компоненты взвешивали на весах с точностью 0,1 г. Далее для увеличения химической активности порошковых смесей проводили их механоактивацию в шаровой мельнице в течение 2 ч.

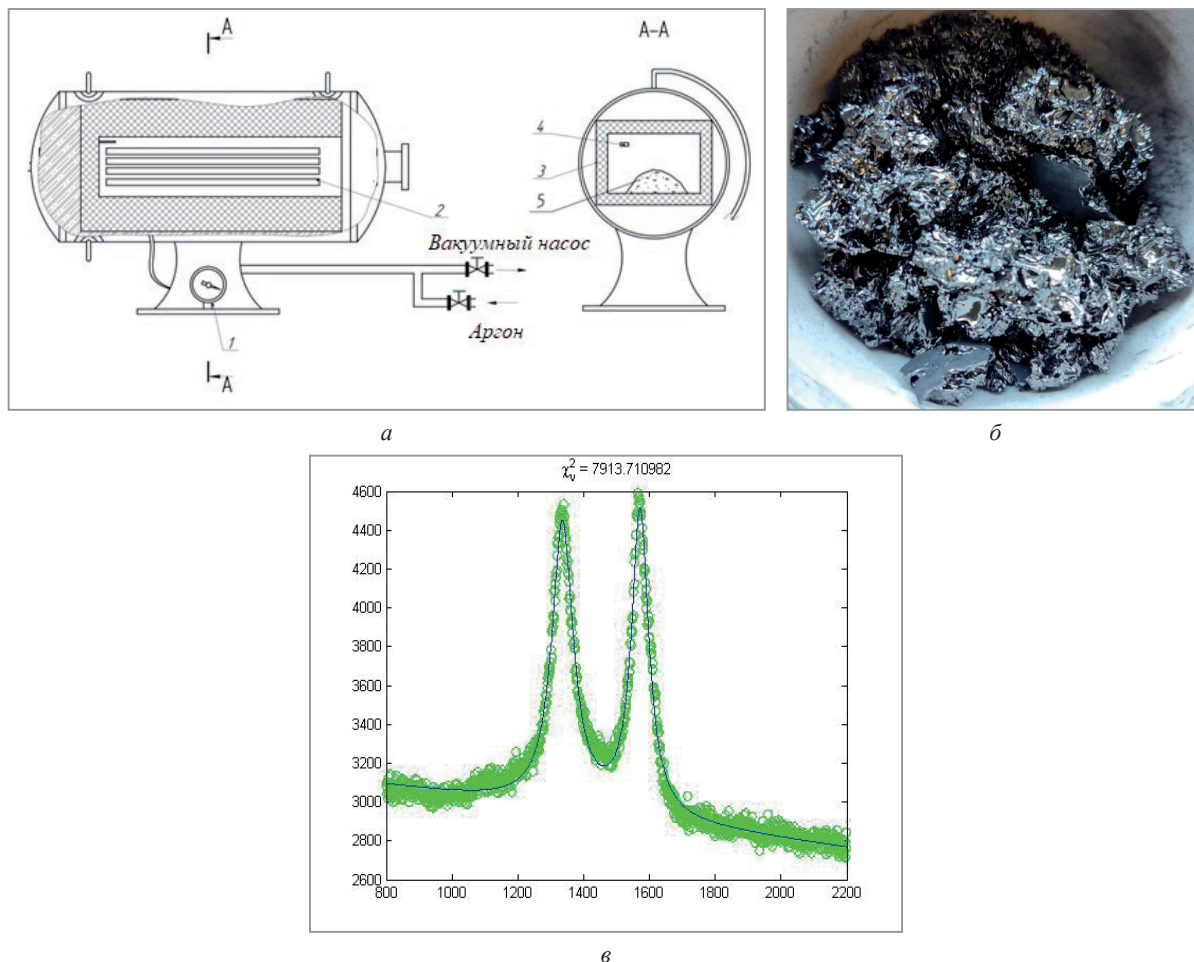


Рис.1. Изготовление стеклоглерода для получения лигатур:
 а – общий вид установки для получения стеклоглерода (1 – манометр; 2 – нагревательная спираль;
 3 – муфель; 4 – термопара; 5 – синтезируемый материал); б – полученный стеклоглерод;
 в – рамановский спектр полученного стеклоглерода

Составы для приготовления лигатур

Номер состава	Исходные компоненты и их содержание
1	90% Al (ПА-4) – 10% С (стеклоглерод)
2	90% Al (ПА-4) – 10% С (графитоподобный углерод)
3	80% Al (ПА-4) – 20% Si (КР00) – 10% С (стеклоглерод)
4	40% Al (ПА-4) – 40% В ₂ О ₃ –20% С (графит)

После механоактивации полученные смеси подвергали брикетированию под давлением 380 МПа и последующему горячему экструдированию при $T=500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2). Данный подход позволял обеспечить плотный контакт дисперсных частиц с алюминиевой матрицей, разрушение агломератов и получение компактных заготовок с равномерным распределением упрочняющих фаз. Экструзионная обработка также способствовала быстрому растворению и усвоению дисперсных частиц в расплаве и реакционному взаимодействию порошков.

Плавку базовых сплавов Д16 и В95 проводили в индукционной тигельной печи ИСВ-0.04. После полного расплавления шихты и перегрева расплава на 50–70 °С выше температуры ликвидуса в него вводили заранее подготовленные лигатуры. Процесс сопровождался интенсивным перемешиванием для обеспечения равномерного распределения дисперсных частиц в объеме расплава.

После ввода лигатуры расплав выдерживали в течение 1–2 мин при максимальной мощности индукционного нагрева, что обеспечивало активное взаимодействие лигатуры с алюминиевой матрицей и частичное формирование карбидных фаз. Далее расплав разливали в предварительно подогретые металлические формы диаметром 15 и 30 мм.



Рис. 2. Схема процесса получения образцов лигатуры

Полученные заготовки исследовали в литом состоянии, а также после горячей экструзии при 500 °С (степень деформации $\varepsilon \approx 65\%$) и термической обработки по режиму Т6 (закалка с 475 °С для сплава В95 и 490 °С для сплава Д16, старение при 170 °С в течение 8 ч).

Микроструктуру исследовали на оптическом микроскопе МИКРО-200 и сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 с системой энергодисперсионного микроанализа (EDS). Рентгенофазовый анализ проводили с использованием дифрактометра GNR Explorer (CuK α - и CoK α -излучение). Механические свойства (предел прочности σ_B , относительное удлинение δ) определяли на универсальной разрывной машине WDW-100E, твердость по Бринеллю (НВ) – на твердомере ТШ-2М.

Результаты и их обсуждение

Исследование фазового состава полученных лигатур (рис. 3) показывает, что фазовый состав зависит от применяемых исходных компонентов. В лигатуре на основе состава № 1, содержащего стеклоуглерод, установлено формирование фаз карбида алюминия (Al₄C₃). Наличие оксида алюминия свидетельствует о протекании окислительных процессов в ходе приготовления лигатуры, а формирование карбида (Al₄C₃) связано с реакцией алюминия с углеродом в процессе экструзии:



Следует отметить, что углерод в аморфном состоянии проявляет большую активность к алюминию в сравнении с другими его структурными состояниями (например, графитом).

В лигатуре состава № 2, содержащей графитоподобный углерод, также наблюдаются дифракционные максимумы малой интенсивности карбида алюминия Al₄C₃. Присутствие карбида алюминия указывает на реакцию алюминия с углеродсодержащими компонентами, однако малая интенсивность максимумов говорит о его незначительном содержании либо аморфизации.

Лигатура, полученная из порошков алюминия, стеклоуглерода и кремния (состав № 3), имеет фазовый состав, включающий алюминий-кремниевую фазу (Al_{3,21}Si_{0,47}), оксид алюминия (Al₂O₃), карбид алюминия (Al₄C₃), карбид кремния (SiC) и свободный углерод. Присутствие карбида кремния и карбида алюминия свидетельствует о протекании реакции взаимодействия с углеродом кремния и алюминия в процессе экструзии:



В лигатуре на основе состава № 4, состоящей из порошков алюминия и оксида В₂O₃, для данных термомеханических условий не происходит образование карбида бора, а синтезируется тугоплавкая интерметаллидная фаза AlB₁₀ по следующей реакции:



При этом отсутствие фазы оксида алюминия говорит о его возможном аморфном состоянии ввиду малой температуры процесса, о чем свидетельствует рентгенограмма на рис. 3.

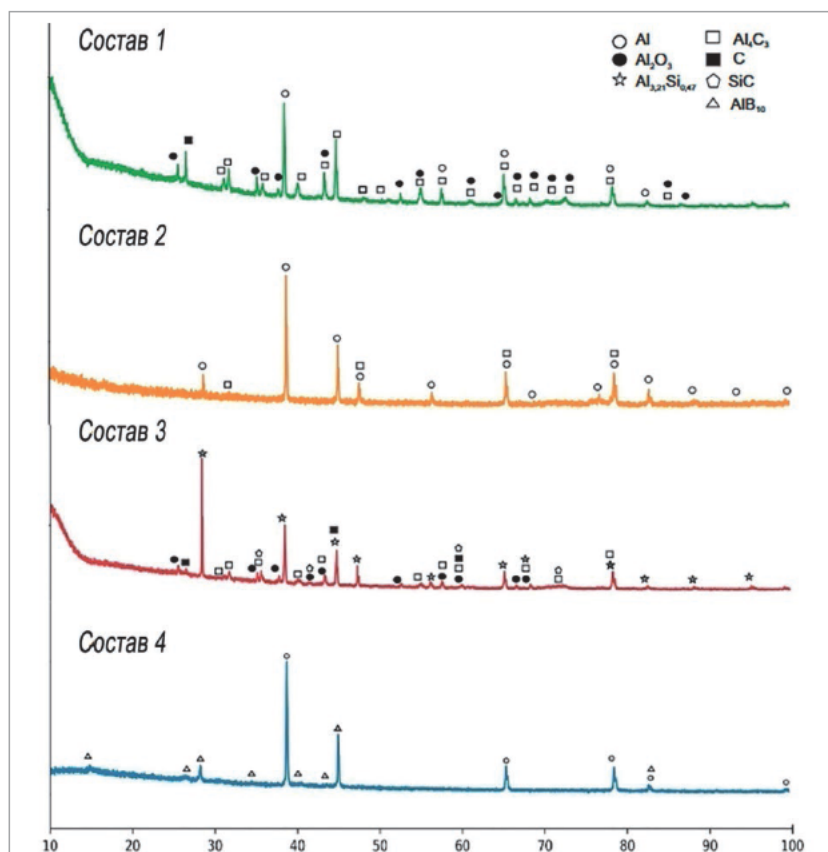


Рис. 3. Фазовый состав полученных лигатур

Результатами рентгенофазового анализа идентифицировано и подтверждено образование борсодержащей фазы, интерпретированной как AlB₁₀ (рис. 3). Структура лигатуры представлена матрицей алюминия с распределенными частицами фазы AlB₁₀ формы, близкой к сферической, размерами 0,8–1,0 мкм (рис. 4).

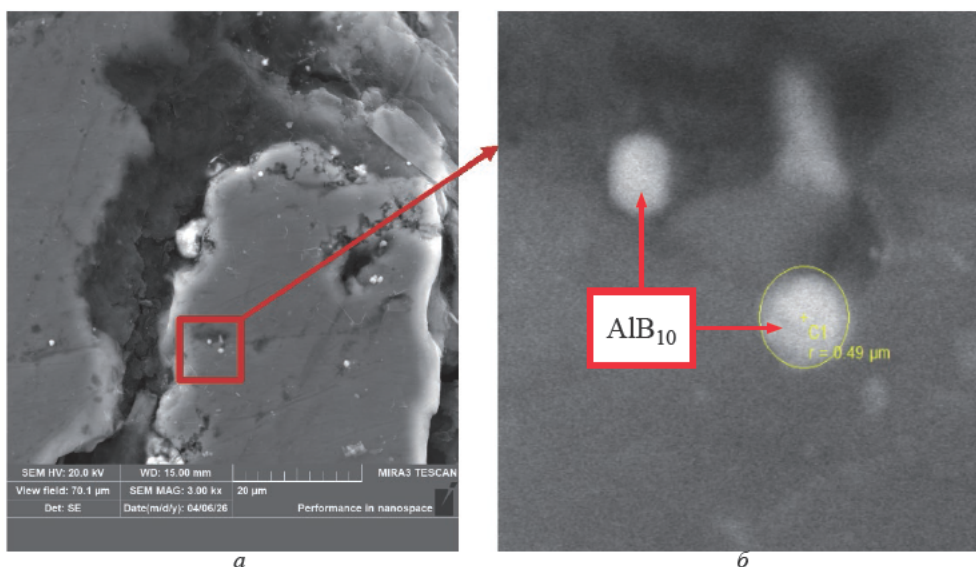


Рис. 4. Структура лигатуры состава № 4 с боридными включениями (а) и расчетный размер включений (б). × 20000

Таким образом, в полученных лигатурах на основе систем алюминий (алюминий – кремний) – углерод наблюдается формирование фаз карбидов Al_4C_3 , а также боридов AlB_{10} , которые могут оказывать упрочняющее воздействие при формировании алюмоматричных композитов. При введении полученных лигатур в расплав синтезированные дисперсионные фазы могут оказывать влияние на структуру и свойства матрицы и композита в целом.

Исследование механических свойств полученных алюминиевых композитов в литом состоянии показало, что введение дисперсных частиц в сплав В95 оказывает более выраженное упрочняющее воздействие по сравнению со сплавом Д16 (рис. 5). При этом для сплава Д16 достижение максимальной прочности на уровне 291 МПа при введении лигатуры состава № 4 (с частицами AlB_{10}) сопровождается снижением пластичности с 11 до 7% (рис. 5, б). Напротив, в сплаве В95 при аналогичных добавках и увеличении прочности до 370 МПа наблюдается рост пластичности с 5 до 7% (рис. 5, а). Следует отметить, что наибольший эффект в обоих случаях достигается при использовании комплексной лигатуры состава № 4.

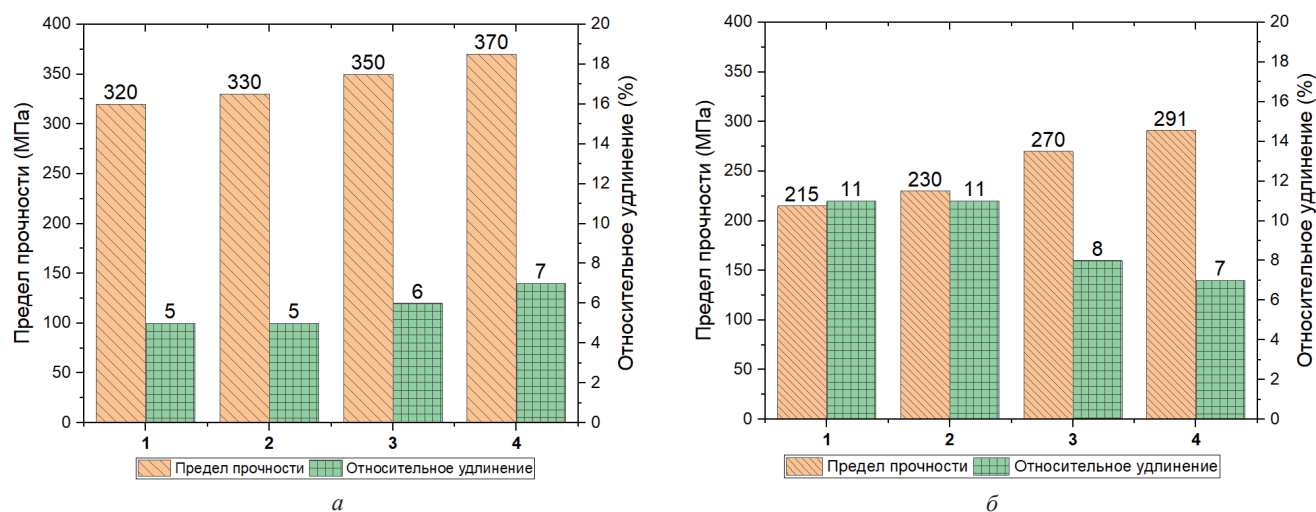


Рис. 5. Механические свойства сплава В95 (а) и Д16 (б) после ввода дисперсных частиц в составе различных лигатур (№ 1–4) в литом состоянии

Поскольку рассматриваемые материалы относятся к деформируемым алюминиевым сплавам, а их максимальные эксплуатационные свойства реализуются после обработки давлением и последующей термической обработки, влияние дисперсных частиц в составе лигатур целесообразно анализировать с учетом их воздействия на структурные изменения и механические свойства в ходе деформационных и термических процессов. На рис. 6 приведены сравнительные показатели механических свойств сплавов В95 и Д16, а также композитов на их основе с лигатурой состава № 4 после экструзии и термической обработки. Из рисунка видно, что прочность композита на основе В95 возрастает с 250 до 570 МПа при введении дисперсных добавок боридов алюминия, при этом его пластичность практически не изменяется (7,0 и 6,5% соответственно, рис. 6, а). Для композита на основе Д16 (рис. 6, б) наблюдается интересное явление – аномальное повышение пластичности с 9 до 22% при одновременном росте прочности (на 25%).

Для подтверждения указанных особенностей изменения механических свойств проведен металлографический анализ структуры полученных композитов. В исходном состоянии сплав В95 (рис. 7, а) характеризуется крупными зернами α -твердого раствора и неоднородно расположенными по границам зерен избыточными интерметаллидными фазами (такими, как Al_2CuMg , $Al_2Mg_3Zn_3$, Al_7Cu_2Fe и др.). Добавка лигатуры с частицами AlB_{10} формирует в композите более дисперсную структуру: распределение ее составляющих становится равномерным, интерметаллидные фазы приобретают округлый вид. Вероятно, частицы AlB_{10} могут выступать в качестве эффективных центров кристаллизации, обеспечивая измельчение зерна и тем самым повышая его свойства.

Аналогично структура базового сплава Д16 и композита на его основе с добавлением лигатуры № 4 существенно различается. В исходном состоянии сплав Д16 (рис. 8, а) характеризуется также сравнительно грубой и неоднородной структурой: наблюдаются крупные зерна α -Al (до 200 мкм) с неравномерным распределением вторичных фаз (вероятно, интерметаллидов типа θ -фазы (Al_2Cu), S -фазы (Al_2CuMg)). После введения в сплав Д16 борсодержащей лигатуры (рис. 8, б) структура существенно изменяется:

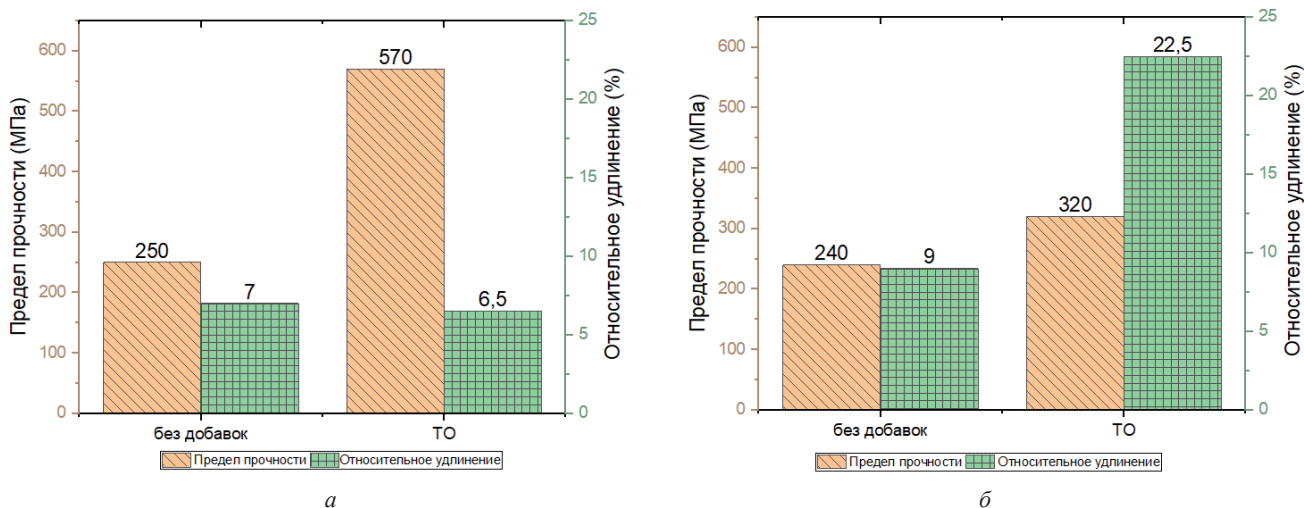


Рис. 6. Изменение прочности и пластичности композита на основе сплава В95 (а) и Д16 (б) после ввода лигатур состава № 4 и проведения экструзии и термической обработки

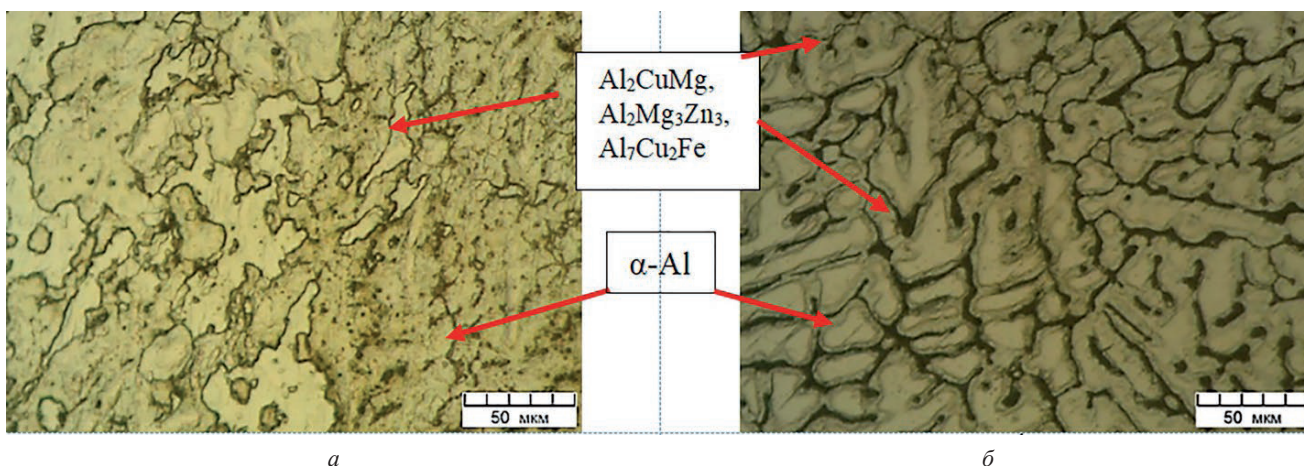


Рис. 7. Микроструктура сплава В95 (а) и композита на его основе с добавками лигатуры состава № 4 (б)

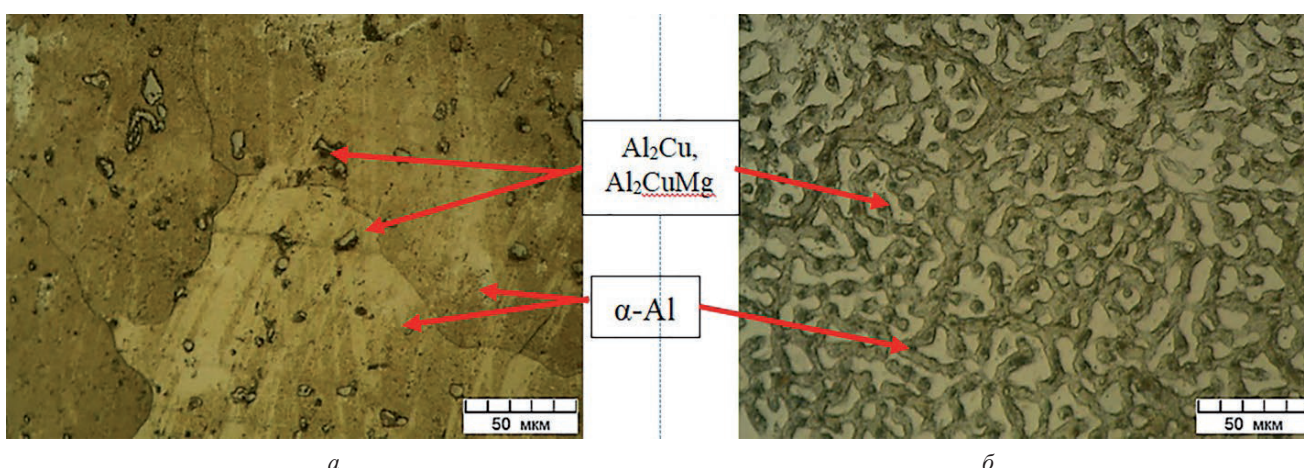


Рис. 8. Микроструктура сплава Д16 (а) и композита на его основе с добавками лигатуры состава № 4 (б)

выраженное диспергирование зерна α -Al до 50 мкм, отсутствуют дендритные образования, а морфология структуры приобретает ячеисто-глобулярный тип. Вторичные фазы распределены более равномерно по объему матрицы, их размеры визуальнo заметно уменьшаются. Это свидетельствует об эффективном модифицирующем воздействии добавки, возможно, за счет увеличения числа центров кристаллизации.

Введение дисперсных частиц AlB_{10} в составе комплексной лигатуры № 4 в сплавы В95 и Д16 обеспечивает модифицирование структуры (измельчение зерна, выравнивание распределения интерметаллидных

фаз), что и приводит к повышению механических свойств. В литом состоянии сплав В95 демонстрирует одновременный рост прочности и пластичности, тогда как для сплава Д16 прочность возрастает при некотором снижении пластичности. После экструзии и термической обработки оба композита показывают существенное увеличение прочности, причем для сплава В95 пластичность сохраняется на исходном уровне, а для сплава Д16 наблюдается аномальный ее рост (с 9 до 22%). Следовательно, использование боридсодержащих лигатур является эффективным способом повышения комплекса механических свойств деформируемых алюминиевых сплавов, особенно в сочетании с последующей деформационной и термической обработкой.

Выводы

В ходе исследования установлено, что введение дисперсных углеродных и карбидных и боридных частиц в алюминиевые сплавы В95 и Д16 через подготовленные лигатуры существенно улучшает их микроструктуру и механические свойства. Для сплава В95, обработанного лигатурой, содержащей бориды, в литом состоянии предел прочности увеличивается с 250 до 370 МПа при сохранении пластичности на уровне 7%, после горячей экструзии и термообработки достигаются максимальные значения прочности до 570 МПа с минимальным снижением удлинения. Для сплава Д16 введение лигатуры повышает прочность с 240 до 270 МПа при $\delta=8\%$, после экструзии до 300 МПа и $\delta=10,5\%$, а после термообработки достигается $\sigma_{\text{в}}=320$ МПа и $\delta=22,5\%$, что демонстрирует хорошее сочетание прочности и пластичности. Микроструктурный анализ показал значительное измельчение зерна, равномерное распределение дисперсных фаз и отсутствие агломератов. Полученные результаты подтверждают эффективность дисперсного упрочнения для создания алюминиевых композитов с улучшенным комплексом механических свойств и их перспективность для применения в конструкционных материалах повышенной прочности и пластичности.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. **Воробьев, Р. А.** Фазовый состав деформируемых алюминиевых сплавов Д16 и В95 с количественной оценкой пережога разных стадий развития / Р. А. Воробьев, С. А. Сорокина, В. В. Евстифеева // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2020. – № 1. – С. 68–78.
2. **Фридляндер, И. Н.** Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы / И. Н. Фридляндер. – М.: Металлургия, 1979. – 208 с.
3. **Волочко, А. Т.** Алюминий: технологии и оборудование для получения литых изделий / А. Т. Волочко, М. А. Садоха. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 387 с.
4. Модифицирующее воздействие субмикронного диоксида кремния, структурированного наночастицами бора и титана, на процесс формирования микроструктуры и свойств поршневого сплава / А. Т. Волочко [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2010. – № 2. – С. 11–19.
5. **Wang, J.** Research Status and Prospective Properties of the Al-Zn-Mg-Cu Series Aluminum Alloys / J. Wang, F. Li // Metals. – 2023. – Vol. 13, no. 8. – P. 1–24.
6. **Возняковский, А. А.** Исследование теплофизических, механических и прочностных свойств композиционных материалов на основе углеродных наноструктур: дис. ... канд. техн. наук: 02.00.21 / А. А. Возняковский. – СПб., 2021. – 118 с.

REFERENCES

1. **Vorobyov R. A., Sorokina S. A., Evstifeeva V. V.** Fazovyy sostav deformiruemyh alyuminievyh splavov D16 i V95 s kolichestvennoj ocenкой perezhoга raznyh stadij razvitiya [Phase composition of deformable aluminum alloys D16 and V95 with a quantitative assessment of burnout at different stages of development]. *Izvestiya vuzov. Cvetnaya metallurgiya = News of universities. Non-ferrous metallurgy*, 2020, no. 1, pp. 68–78.
2. **Fridlyander I. N.** *Alyuminievye deformiruemye konstrukcionnye splavy* [Aluminum deformable structural alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979, 208 p.
3. **Volochko A. T., Sadokha M. A.** *Alyuminij: tekhnologii i oborudovanie dlya polucheniya lityh izdelij* [Aluminum: technologies and equipment for producing cast products]. Minsk, Belarus. navuka Publ., 2011, 387 p.
4. **Volochko A. T., Komarov A. M., Komarova V. I.** [et al.]. Modificiruyushchee vozdejstvie submikronnogo dioksida kremniya, strukturirovannogo nanochasticami bora i titana, na process formirovaniya mikrostruktury i svojstv porshneвого сплава [Modifying effect of submicron silicon dioxide structured by boron and titanium nanoparticles on the process of formation of microstructure and properties of piston alloy]. *Vesci HAH Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2010, no. 2, pp. 11–19.
5. **Wang J., Li F.** Research Status and Prospective Properties of the Al-Zn-Mg-Cu Series Aluminum Alloys. *Metals*, 2023, vol. 13, no. 8, pp. 1–24.
6. **Voznyakovskiy A. A.** *Issledovanie teplofizicheskikh, mekhanicheskikh i prochnostnykh svojstv kompozicionnykh materialov na osnove ugleodnykh nanostruktur: dis. ... kand. tekhn. nauk: 02.00.21* [Study of thermophysical, mechanical and strength properties of composite materials based on carbon nanostructures: dis. ... Cand. of Engineering Sciences: 02.00.21]. St. Petersburg, 2021, 118 p.