

УДК 669.715 : 539.89 : 539.4

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-1-58-66>

Научная статья

Research article



Влияние ротационнойковки на структуру и механические свойства двух эвтектических сплавов систем Al–La и Al–Ca–La

В.А. Андреев¹, М.В. Горшенков², Е.А. Наумова², С.О. Рогачев^{1,2}

¹ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
Россия, 119334, г. Москва, Ленинский пр-т, 49

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1

✉ Станислав Олегович Рогачев (csaap@mail.ru)

Аннотация: Разработанные в последние годы алюминиевые сплавы на основе эвтектики системы алюминий–кальций обладают превосходными литейными свойствами и, в отличие от силуминов, хорошо деформируются. Создание многокомпонентных сплавов, в которых кальций частично замещен лантаном, церием, никелем и другими эвтектикообразующими элементами, позволяет улучшать свойства сплавов за счет формирования более дисперсной эвтектики, а также повышать их теплостойкость. Все перечисленные сплавы можно упрочнять деформационными методами, при этом особенно эффективны методы больших пластических деформаций. Среди них ротационнаяковка представляет наибольший интерес ввиду возможности получения длинномерных заготовок. Лантан в определенной концентрации эффективно повышает пластичность, поэтому сплав системы Al–La является наиболее подходящим для деформационной обработки. Было изучено влияние ротационнойковки на микроструктуру и механические свойства двух эвтектических сплавов: Al–10La и Al–6Ca–3La (мас. %). Ротационнуюковку заготовок в исходно литом состоянии с начального диаметра 20 мм на конечный номинальный диаметр 5 мм осуществляли в изотермических условиях: для сплава Al–10La – при комнатной температуре, а для сплава Al–6Ca–3La – при $t = 200$ °C. Установлено, что в результате ротационнойковки структура обоих сплавов становится вытянутой, внутри дендритов формируются зерна микронного размера, а частицы эвтектики измельчаются. При этом в сплаве Al–10La наблюдается низкая плотность дислокаций, в то время как в сплаве Al–6Ca–3La – повышенная. Сплав Al–10La склонен к небольшому разупрочнению в условиях ротационнойковки, в отличие от сплава Al–6Ca–3La, который проявляет заметную тенденцию к деформационному упрочнению (прочность увеличивается в 2 раза); при этом оба сплава в состоянии послековки сохраняют высокую пластичность (относительное удлинение). Уровень прочности обоих сплавов сохраняется после отжига при $t = 300$ °C. Предел прочности сплава Al–6Ca–3La при температуре испытания 300 °C выше в сравнении со сплавом Al–10La – соответственно 53 и 44 МПа.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, ротационнаяковка, микроструктура, механические свойства.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ИМЕТ РАН № 075-00320-24-00.

Благодарим М.А. Барыкина за помощь в получении слитков и А.В. Дорошенко за помощь в проведении исследований.

Для цитирования: Андреев В.А., Горшенков М.В., Наумова Е.А., Рогачев С.О. Влияние ротационнойковки на структуру и механические свойства двух эвтектических сплавов систем Al–La и Al–Ca–La. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2025;31(1):58–66. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-1-58-66>

Effect of rotary forging on the structure and mechanical properties of two eutectic alloys of the Al–La and Al–Ca–La systems

V.A. Andreev¹, M.V. Gorshenkov², E.A. Naumova², S.O. Rogachev^{1,2}

¹ Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences
49 Leninskiy Prosp., Moscow 119334, Russia

² National University of Science and Technology “MISIS”
1 Bld, 4 Leninskiy Prosp., Moscow 119049, Russia

✉ Stanislav O. Rogachev (csaap@mail.ru)

Abstract: Recently developed aluminum alloys based on the eutectic composition of the Al–Ca system exhibit excellent casting properties and, unlike silumins, show good deformability. The development of multi-component alloys, where calcium is partially replaced by lanthanum, cerium, nickel, and other eutectic-forming elements, improves their properties by producing a finer eutectic structure and enhancing their heat resistance. These alloys can all be strengthened through deformation, with severe plastic deformations being especially effective. Among these methods, rotary forging is of particular interest due to its ability to produce long billets. Lanthanum, at a specific concentration, significantly improves the alloy’s plasticity, making the Al–La system particularly well-suited for deformation processing. This study investigates the effect of rotary forging on the microstructure and mechanical properties of two eutectic alloys, Al–10La and Al–6Ca–3La (wt. %). Billets in the as-cast state were rotary forged from an initial diameter of 20 mm to a final nominal diameter of 5 mm under isothermal conditions: at room temperature for the Al–10La alloy and at 200 °C for the Al–6Ca–3La alloy. The results showed that rotary forging led to an elongated structure in both alloys, with micron-sized grains forming inside the dendrites and eutectic particles being refined. In the Al–10La alloy, the dislocation density was low, while in the Al–6Ca–3La alloy, the dislocation density was higher. The Al–10La alloy showed a slight tendency to soften during rotary forging, whereas the Al–6Ca–3La alloy exhibited a marked tendency to strengthen (its strength doubled). Both alloys retained high plasticity (elongation) after forging. After annealing at 300 °C, the strength of both alloys remained stable. The tensile strength of the Al–6Ca–3La alloy at 300 °C was higher than that of the Al–10La alloy, with values of 53 MPa and 44 MPa, respectively.

Keywords: aluminum alloy, rotary forging, microstructure, mechanical properties.

Acknowledgments: The work was carried out within the state assignment of Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of Russian Academy of Sciences (project No. 075-00320-24-00).

We thank M.A. Barykin for assistance in obtaining ingots and A.V. Doroshenko for assistance in conducting the research.

For citation: Andreev V.A., Gorshenkov M.V., Naumova E.A., Rogachev S.O. Effect of rotary forging on the structure and mechanical properties of two eutectic alloys of the Al–La and Al–Ca–La systems. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2025;31(1):58–66. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-1-58-66>

Введение

Алюминиевые сплавы на основе эвтектики Al–Me (где Me — Ca, Ce, La, Ni, Fe) имеют композиционную структуру (алюминиевая основа и эвтектика), обладают превосходными литейными свойствами и хорошо деформируются [1–6]. Кроме того, сплавы Al–La, Al–Ce, Al–Ni, а в ряде случаев и Al–Fe, имеют повышенную теплостойкость [7; 8]. Несмотря на близкий уровень прочности, пластичность всех перечисленных сплавов заметно отличается, поскольку она напрямую зависит от состава эвтектики. Лантан в определенной концентрации эффективно повышает пластичность [9], поэтому сплав системы Al–La является наиболее подходящим для деформационной обработки. Относительное удлинение сплава около эвтектического состава Al–10La

(мас. %) составляет ~22% [9], а увеличение содержания лантана, напротив, снижает пластичность [10]. Недостатком лантана является его высокая цена. В то же время сплавы системы Al–Ca, среди вышеперечисленных, являются самыми экономичными. Поэтому представляет интерес использовать малые добавки лантана в составе сложных эвтектик, например, создавая сплавы на основе системы Al–Ca–La. Сложные эвтектики изучали в ряде работ [11–13].

Все перечисленные сплавы хорошо упрочняются как традиционными деформационными методами (прокаткой), так и методами больших пластических деформаций [6; 9; 11; 14–16]. Среди последних наибольший интерес представляет ротационная ковка, поскольку, обеспечивая высокие

степени деформации, позволяет получать длинномерные заготовки [17–19].

В связи с вышесказанным, работа нацелена на исследование влияние лантана в составе эвтектики на прочность и пластичность алюминиевого сплава Al–6%Ca–3%La в условиях ротационнойковки. В качестве материала для сравнения использовали эвтектический сплав Al–10%La.

Материалы и методики исследования

Исследовали два сплава около эвтектического состава: Al–6Ca–3La и Al–10La (мас. %). Отливки длиной 200 мм и диаметром 22 мм обрабатывали на токарном станке до диаметра 20 мм, после чего подвергали ротационнойковке. Ковку заготовок в исходно литом состоянии на конечный номинальный диаметр 5 мм осуществляли на ротационно-ковочной машине РКМ1 (B2129.01) за несколько проходов; обжатие за проход составляло от 5 до 22 % (в среднем 13 %). Заготовки из сплава Al–6Ca–3La перед каждым последующим проходом нагревали в трубчатой электропечи до температуры 200 °С, выдерживая 10–15 мин; заготовки из сплава Al–10La ковали без нагрева. На больших диаметрах (свыше 10 мм) подача заготовки осуществлялась вручную, на дальнейших проходах использовалась автоматическая валковая подача, обеспечивающая прямолинейность заготовки и более равномерное распределение деформации по ее длине. Конечный диаметр заготовок из сплавов Al–6Ca–3La и Al–10La составил, соответственно, 5,5 и 5,4 мм, что соответствует эквивалентной деформации $e = 2,6$.

Для характеристики образцов применяли просвечивающую электронную микроскопию (ПЭМ)

(микроскопы JEM-1400 и JEM-2100 от JEOL, Япония), измерение микротвердости по Виккерсу («Micromet 5101», Buehler, США) и испытание на растяжение. Для растяжения использовали два типа образцов: круглого сечения с размером калибровочной части $\varnothing 4 \times 10$ мм и плоского сечения с размером калибровочной части $5 \times 1,5 \times 1$ мм. Испытания при комнатной температуре проводили на круглых и плоских образцах с помощью машин «Instron 5569» и «Instron 5966» (Instron Corp., США) соответственно, а при $t = 300$ °С — только на круглых образцах посредством машины «Instron 3382». Скорость деформации растяжением составляла $0,002$ с⁻¹.

Результаты исследования

Сплав Al–10La в литом состоянии имел преимущественно эвтектическую структуру [(Al) + Al₁₁La₃] с небольшой долей дендритов алюминия (рис. 1, а). В результате ротационнойковки структурные элементы сплава вытягиваются вдоль оси заготовки, кроме того, внутри дендритов формируются новые ультрамелкие зерна размером менее 1 мкм (указаны стрелками на рис. 2, а), а частицы эвтектики дробятся сколом на фрагменты длиной около 100–200 нм, о чем свидетельствует ровная граница раздела между двумя измельченными частицами (рис. 2, б). Очевидно, в некоторых областях структуры происходит перемешивание дендритов и эвтектики как результат массопереноса. На изображениях, полученных ПЭМ, видно, что плотность дислокаций в сплаве невысокая.

Отличие структуры сплава Al–6Ca–3La в литом состоянии от сплава Al–10La заключается в более коротких и широких частицах эвтектики

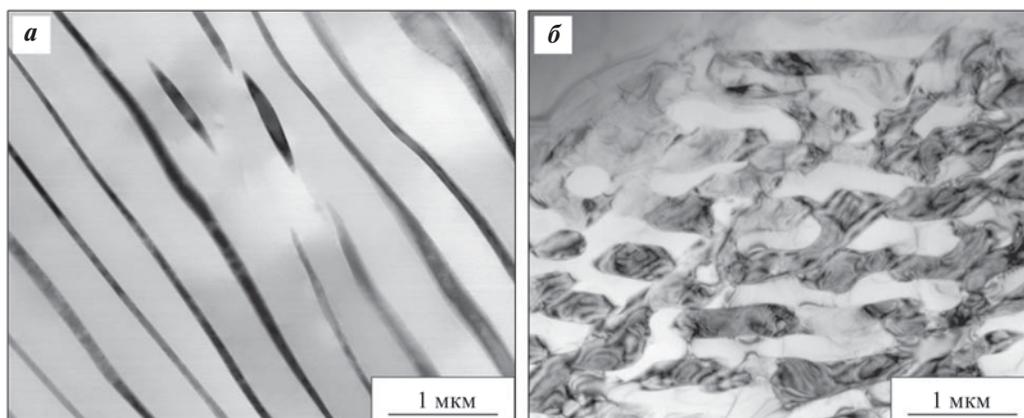


Рис. 1. Микроструктура сплавов Al–10La (а) и Al–6Ca–3La (б) в литом состоянии (светлопольные изображения ПЭМ)

Fig. 1. Microstructure of the as-cast Al–10La (а) and Al – 6Ca – 3La (б) alloys (bright-field TEM images)

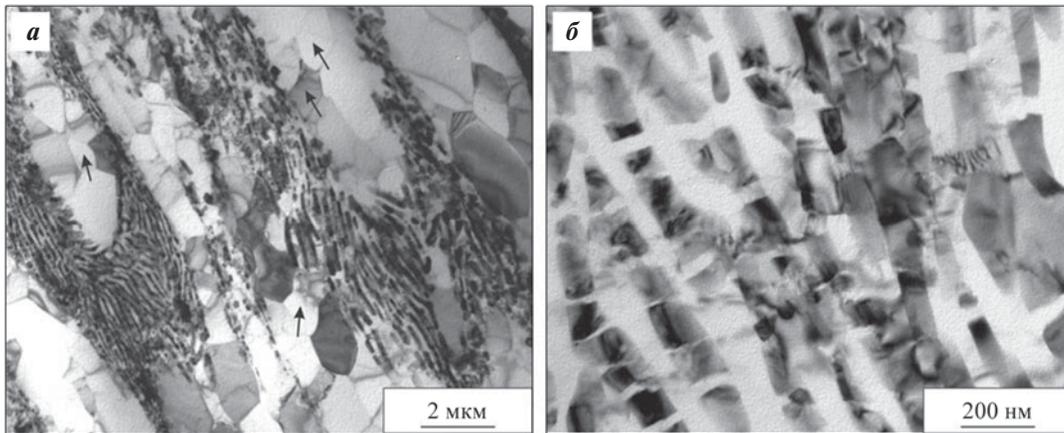


Рис. 2. Микроструктура сплава Al–10La после ротационнойковки (светлопольные изображения ПЭМ)

Fig. 2. Microstructure of the Al–10La alloy after rotary forging (bright-fields TEM images)

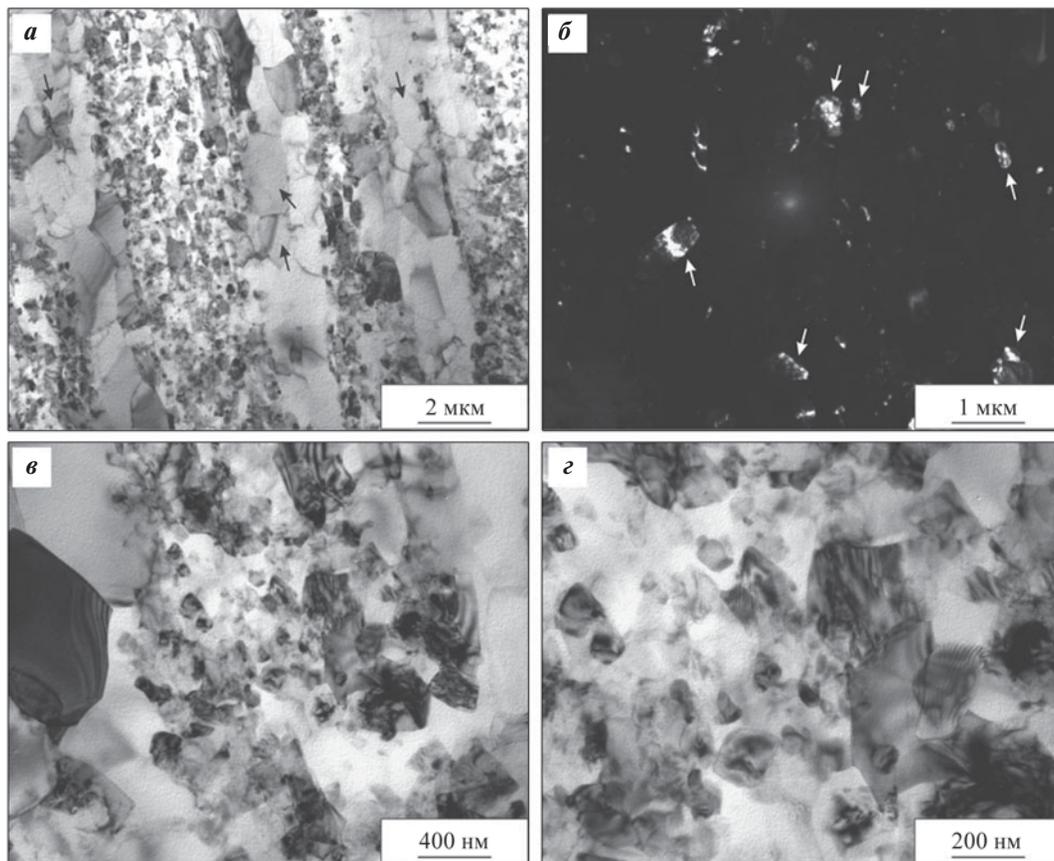


Рис. 3. Микроструктура сплава Al–6Ca–3La после ротационнойковки

a, в, г – светлопольные изображения ПЭМ; *б* – темнопольное изображение ПЭМ в рефлексах (Al)

Fig. 3. Microstructure of the Al–6Ca–3La alloy after rotary forging

a, в, г – bright-field TEM images; *б* – dark-field TEM image in (Al) reflections

(рис. 1, б). Согласно [20], в системе Al–Ca–La образуется тройная эвтектика [(Al) + Al₄(Ca,La) + Al₁₁(La,Ca)₃]. В результате ротационнойковки сплава Al–6Ca–3La, аналогично сплаву Al–10La,

происходит перемешивание дендритов и эвтектики, структурные элементы вытягиваются, внутри дендритов формируются новые ультрамелькие зерна (указаны стрелками на рис. 3, а, б). При этом

частицы эвтектики измельчаются сильнее (до 50–100 нм), заметно участие диффузионных процессов, что подтверждает округлая форма измельченных частиц (рис. 3, в, г). В структуре бывшей эвтектики наблюдается повышенная плотность дислокаций, о чем свидетельствует характерный контраст на изображении.

Механические свойства алюминиевых сплавов в литом и ковном состояниях, полученные при комнатной температуре испытания, приведены в табл. 1. Условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$) и предел прочности (σ_B) сплава Al–10La в литом состоянии составили 113 и 173 МПа соответственно, а полное относительное удлинение $\delta \sim 22\%$. Для спла-

ва Al–6Ca–3La в литом состоянии $\sigma_{0,2} = 109$, $\sigma_B = 194$ МПа, $\delta = 20\%$.

Типичные кривые растяжения, построенные при испытании круглых образцов кованных сплавов, показаны на рис. 4. Основное отличие при испытаниях плоских и круглых образцов сплава Al–10La заключается в большем (в 2 раза) относительном удлинении последних (табл. 1). В отличие от сплава Al–10La, разница в механических свойствах сплава Al–6Ca–3La при испытаниях круглых и плоских образцов невелика (табл. 1).

В результате ротационнойковки сплава Al–10La его условный предел текучести остается неизменным или повышается не более чем на 10%, а

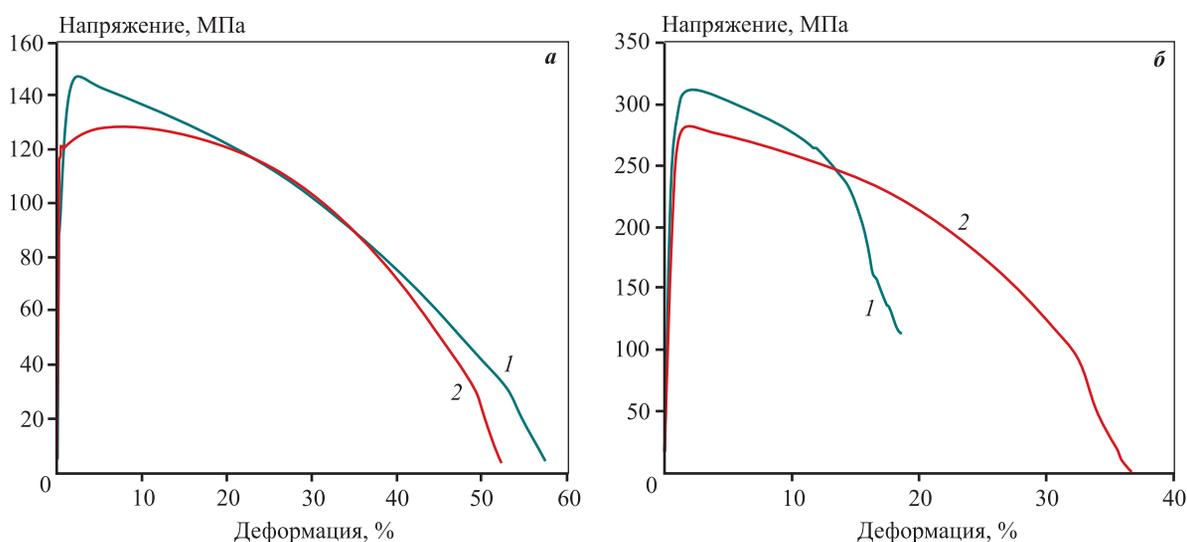


Рис. 4. Кривые растяжения при комнатной температуре образцов сплавов Al–10La (а) и Al–6Ca–3La (б) после ротационнойковки (1) и последующего отжига при $t = 300\text{ °C}$ (2)

Fig. 4. Tensile curves at room temperature for specimens of Al–10La (a) and Al–6Ca–3La (b) alloys after rotary forging (1) and after subsequent annealing at $t = 300\text{ °C}$ (2)

Таблица 1. Механические свойства алюминиевых сплавов в различных состояниях при комнатной температуре

Table 1. Mechanical properties of aluminum alloys in various conditions at room temperature

Сплав	Состояние материала	Тип образца	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	$\delta_{\text{равн}}$, %
Al–10La	Литой	Плоский	113 ± 2	173 ± 3	22 ± 1	8 ± 1
	РК*	Плоский	126 ± 3	142 ± 1	27 ± 2	$1,5 \pm 0,5$
		Круглый	101 ± 2	147 ± 3	58 ± 2	$2,5 \pm 0,5$
	РК и отжиг при 300 °C	Круглый	123 ± 2	131 ± 2	52 ± 2	8 ± 1
Al–6Ca–3La	Литой	Плоский	109 ± 2	194 ± 3	$19,5 \pm 1,3$	$8,5 \pm 0,5$
	РК	Плоский	252 ± 4	303 ± 3	$23,5 \pm 0,5$	$2,5 \pm 0,3$
		Круглый	285 ± 3	312 ± 6	$21,6 \pm 1,5$	$3,0 \pm 0,5$
	РК и отжиг при 300 °C	Круглый	250 ± 6	283 ± 6	37 ± 2	$2,0 \pm 0,5$

* РК – ротационнаяковка.

предел прочности, напротив, снижается на 18 %, при этом немного увеличивается относительное удлинение (табл. 1). Одновременно меняется вид кривой растяжения, а именно резко уменьшается область равномерной пластической деформации (до образования шейки, с 8 до 1,5 %); таким образом, практически все удлинение образца происходит в области локализованной деформации (рис. 4, а).

В результате ротационной ковки сплава Al–6Ca–3La его условный предел текучести и предел прочности возрастают в 2,3 и 1,6 раз соответственно, в то время как полное относительное удлинение увеличивается незначительно — с 19 до 23 % (табл. 1). При этом равномерное удлинение у ковального образца также уменьшается (с 8,5 до 2,5 %, см. рис. 4, б).

Результаты растяжения хорошо коррелируют с измеренными значениями микротвердости (рис. 5). Среднее значение микротвердости в сплавах Al–10La и Al–6Ca–3La литого состояния составило 52 ± 2 и 58 ± 1 HV соответственно, а после ротационной ковки — 42 ± 1 HV (разупрочнение) и 82 ± 2 HV (упрочнение). Микротвердость распределена равномерно в поперечном сечении заготовок обоих сплавов.

Отжиг образцов обоих сплавов при температуре 300 °C (1 ч) снижает прочность не более чем на 10 % (см. табл. 1 и рис. 4). При этом в сплаве Al–10La полное относительное удлинение существенно не изменяется, но значительно увеличивается равномерная деформация (до 8 %). Напротив, в сплаве Al–6Ca–3La полное относительное удлинение повышается до 37 %, а равномерная деформация не

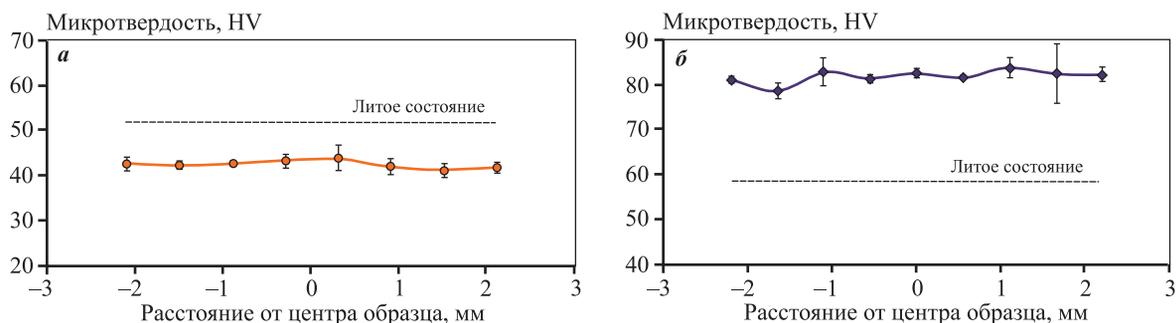


Рис. 5. Распределение микротвердости в поперечном сечении образцов сплавов Al–10La (а) и Al–6Ca–3La (б) до и после ротационной ковки

Fig. 5. Microhardness distribution across the cross-section of specimens of Al–10La (a) and Al–6Ca–3La (b) alloys before and after rotary forging

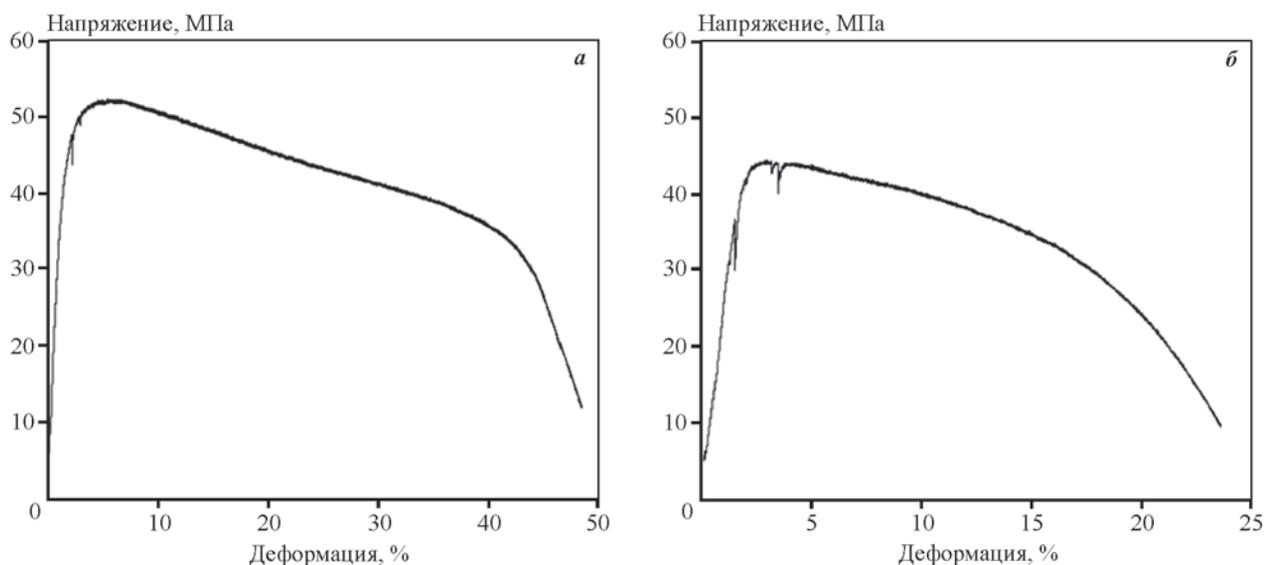


Рис. 6. Кривые растяжения при температуре испытания 300 °C ковальных сплавов Al–6Ca–3La (а) и Al–10La (б)

Fig. 6. Tensile curves at a test temperature of 300 °C for forged Al–6Ca–3La (a) and Al–10La (b) alloys

Таблица 2. Механические свойства кованых алюминиевых сплавов при температуре испытания 300 °С

Table 2. Mechanical properties of forged aluminum alloys at a test temperature of 300 °С

Сплав	Тип образца	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
Al–10La	Круглый	34 ± 1	44 ± 1	22,9 ± 0,5
Al–6Ca–3La	Круглый	36 ± 1	53 ± 1	47,7 ± 0,5

изменяется. Сохранение комплекса высоких механических свойств обоих сплавов после отжига при $t = 300$ °С свидетельствует об их высокой термической устойчивости.

В табл. 2 приведены механические свойства алюминиевых сплавов в кованом состоянии, полученные при температуре испытания 300 °С, а на рис. 6 — кривые растяжения. Повышение температуры испытания с комнатной до 300 °С приводит к резкому разупрочнению обоих сплавов. У сплава Al–10La условный предел текучести и предел прочности уменьшаются до 34 и 44 МПа соответственно, т.е. в 3 раза, при этом относительное удлинение снижается в 2,5 раза. У сплава Al–6Ca–3La условный предел текучести и предел прочности уменьшаются до 36 и 53 МПа соответственно, т.е. в 8 и 6 раз, при этом относительное удлинение, напротив, возрастает в 2 раза. Такой уровень прочности близок к сплавам Д18 или АМц и немного уступает сплаву АМг2. Несмотря на более интенсивное разупрочнение, прочность сплава Al–6Ca–3La при температуре испытания 300 °С оказывается немного больше по сравнению со сплавом Al–10La.

Обсуждение полученных результатов

Согласно полученным результатам измерения микротвердости и испытаний на растяжение, сплав Al–10La склонен к небольшому разупрочнению в условиях ротационнойковки, в отличие от сплава Al–6Ca–3La, который проявляет заметную тенденцию к деформационному упрочнению. Кроме этого, у обоих сплавов после деформационной обработки уменьшилась величина равномерной деформации (до образования шейки), хотя полное относительное удлинение до разрыва, напротив, увеличилось. Низкая прочность сплава Al–10La после ротационнойковки, сопоставимая с прочностью литого состояния, подтверждается

низкой плотностью дислокаций в его микроструктуре (см. рис. 2, а), которая может быть следствием возврата (рис. 2, а). С другой стороны, низкая плотность дислокаций в структуре сплава способствует его высокой пластичности. Ранее было показано, что эвтектические частицы $Al_{11}La_3$ за счет их определенного кристаллографического соотношения с алюминиевой матрицей легко перерезаются дислокациями [9], что также положительно влияет на пластичность. Интересно отметить, что, несмотря на низкую плотность дислокаций в структуре, равномерная деформация у сплава Al–10La составляет всего около 2 %, а удлинение образца происходит в основном в области локализованной деформации, т.е. после начала формирования шейки.

Напротив, в сплаве Al–6Ca–3La накапливается высокая плотность дислокаций и измельчается эвтектика, как результат ротационнойковки, что обуславливает существенное повышение его прочности. Несмотря на высокую прочность, сплав также сохраняет высокую пластичность (удлинение образца происходит в основном в области локализованной деформации, т.е. после начала формирования шейки, аналогично сплаву Al–10La). Это может быть связано как с наличием ультрамелких зерен алюминия (образующих прослойки между бывшей эвтектикой и свободных от дефектов, см. рис. 3, а), обеспечивающих релаксацию напряжений, так и с положительным влиянием лантана, входящего в состав сложной эвтектики, на процессы скольжения дислокаций.

Заключение

Была проведена ротационнаяковка заготовок алюминиевых сплавов эвтектического состава Al–10La и Al–6Ca–3La в исходно литом состоянии с начального номинального диаметра 20 мм на конечный номинальный диаметр 5 мм. Установлено, что в результатековки структура обоих сплавов приобретает направленность вдоль оси заготовки, внутри дендритов формируются новые ультрамелкие зерна (менее 1 мкм), а частицы эвтектики измельчаются (до 100–200 нм в сплаве Al–10La и до 50–100 нм в сплаве Al–6Ca–3La). При этом в сплаве Al–10La наблюдается низкая плотность дислокаций, а в сплаве Al–6Ca–3La — повышенная. Структурные изменения в сплавах влияют на их механические свойства: сплав Al–10La склонен к небольшому разупрочнению в условиях ротационнойковки, в отличие от сплава Al–6Ca–3La, который проявляет заметную

тенденцию к деформационному упрочнению (прочность увеличивается в 2 раза). Предел прочности кованных сплавов Al–10La и Al–6Ca–3La составил около 150 и 300 МПа соответственно. Оба сплава послековки сохраняют высокую пластичность (относительное удлинение свыше 20 %). Уровень прочности обоих сплавов сохраняется после отжига при $t = 300$ °С. Предел прочности сплава Al–6Ca–3La при температуре испытания 300 °С немного больше по сравнению со сплавом Al–10La: 53 и 44 МПа соответственно.

Список литературы/References

- Ozturk K., Chen Long-Qing, Liu Zi-Kui. Thermodynamic assessment of the Al–Ca binary system using random solution and associate models. *Journal of Alloys and Compounds*. 2002;340(1–2):199–206. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(01\)01713-3](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(01)01713-3)
- Hawksworth A., Rainforth W.M., Jones H. Solidification microstructure selection in the Al-rich Al–La, Al–Ce and Al–Nd systems. *Journal of Crystal Growth*. 1999;197(1–2):286–296. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(98\)00955-5](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(98)00955-5)
- Cacciamani G., Ferro R. Thermodynamic modeling of some aluminium-rare earth binary systems: Al–La, Al–Ce and Al–Nd. *Calphad*. 2001;25(4):583–597. [https://doi.org/10.1016/S0364-5916\(02\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0364-5916(02)00009-3)
- Czerwinski F. Cerium in aluminum alloys. *Journal of Materials Science*. 2020;55:24–72. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03892-z>
- Voroshilov D.S., Sidelnikov S.B., Bepalov V.M., Sokolov R.E., Bermeshev T.V., Berngardt V.A., Lezhnev S.N., Durnopyanov A.V., Kovaleva A.A., Konstantinov I.L., Novikova O.S., Motkov M.M. Combined rolling-extrusion of various billets from the Al–Ce–La alloy for electrical wire production. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024;131:4699–4725. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13339-8>
- Belov N.A., Alabin A.N., Eskin D.G. Improving the properties of cold rolled Al–6%Ni sheets by alloying and heat treatment. *Scripta Materialia*. 2004;50(1):89–94. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2003.09.033>
- Cao Z., Kong G., Che Ch., Wang Y., Peng H. Experimental investigation of eutectic point in Al-rich Al–La, Al–Ce, Al–Pr and Al–Nd systems. *Journal of Rare Earths*. 2017;35(10):1022–1028. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(17\)61008-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(17)61008-1)
- Белов Н.А., Золоторевский В.С. Литейные сплавы на основе алюминий-никелевой эвтектики (никалины) как возможная альтернатива силуминам. *Цветные металлы*. 2003;(2):99–105.
- Belov N.A., Zolotarevskii V.S. Casting alloys on the base of aluminum-nickel eutectic (nikalines) as possible alternative to silumins. *Tsvetnye Metally*. 2002;(2):99–105. (In Russ.).
- Rogachev S.O., Naumova E.A., Lukina E.A., Zavadov A.V., Khatkevich V.M. High strength Al–La, Al–Ce, and Al–Ni eutectic aluminum alloys obtained by high-pressure torsion. *Materials*. 2021;14(21):6404. <https://doi.org/10.3390/ma14216404>
- He Y., Liu J., Qiu Sh., Deng Zh., Zhang J., Shen Y. Microstructure evolution and mechanical properties of Al–La alloys with varying La contents. *Materials Science and Engineering: A*. 2017;701:134–142. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.06.023>
- Murashkin M.Y., Sabirov I., Medvedev A.E., Enikeev N.A., Lefebvre W., Valiev R.Z., Sauvage X. Mechanical and electrical properties of an ultrafine grained Al–8.5 wt.% RE (RE = 5.4 wt.% Ce, 3.1 wt.% La) alloy processed by severe plastic deformation. *Materials and Design*. 2016;90:433–442. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.163>
- Shurkin P.K., Letyagin N.V., Yakushkova A.I., Samoshina M.E., Ozherelkov D.Y., Akopyan T.K. Remarkable thermal stability of the Al–Ca–Ni–Mn alloy manufactured by laserpowder bed fusion. *Materials Letters*. 2021;285:129074. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.129074>
- Belov N.A., Naumova E.A., Eskin D.G. Casting alloys of the Al–Ce–Ni system: microstructural approach to alloy design. *Materials Science and Engineering: A*. 1999;271(1–2):134–142. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00343-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00343-3)
- Рогачев С.О., Наумова Е.А., Карелин Р.Д., Андреев В.А., Перкас М.М., Юсупов В.С., Хаткевич В.М. Структура и механические свойства эвтектического алюминиевого сплава Al–Ca–Mn–Fe–Zr–Sc после теплового равноканального углового прессования. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021;27(2):56–65. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2021-2-56-65>
- Rogachev S.O., Naumova E.A., Karelin R.D., Andreev V.A., Perkas M.M., Yusupov V.S., Khatkevich V.M. Structure and mechanical properties of Al–Ca–Mn–Fe–Zr–Sc eutectic aluminum alloy after Warm equal channel angular pressing. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021;62:293–301. <https://doi.org/10.3103/S1067821221030123>
- Xu R., Lu Y., Dai Y., Brognara A., Hahn H., Ivanisenko Y. Processing of high-strength thermal-resistant Al – 2.2 % cerium – 1.3 % lanthanum alloy rods with high electric conductivity by High Pressure Torsion Extrusion. *Journal of Materials Science*. 2024;59:9075–9090. <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09713-2>

16. Duchaussoy A., Sauvage X., Edalati K., Horita Z., Renou G., Deschamps A., Geuser F.D. Structure and mechanical behavior of ultrafine-grained aluminum-iron alloy stabilized by nanoscaled intermetallic particles. *Acta Materialia*. 2019;167:89–102. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.01.027>
17. Rogachev S.O., Andreev V.A., Yusupov V.S., Bondareva S.A., Hatkevich V.M., Nikolaev E.V. Effect of rotary forging on microstructure evolution and mechanical properties of aluminum alloy / copper bimetallic material. *Metals and Materials International*. 2022;28:1038-1046. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00964-7>
18. Klumpp A., Kauffmann A., Seils S., Dietrich S., Schulze V. Influence of cold rotary swaging on microstructure and uniaxial mechanical behavior in alloy 718. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2021;52:2021–4331. <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06371-w>
19. Асфандияров Р.Н., Рааб Г.И. Исследование метода ротационного обжатия в условиях больших деформаций. *Вестник УГАТУ*. 2016;20(3(73)):3–6. Asfandiyarov R.N., Raab G.I. Investigation of the method of rotary swaging under the conditions of large strains. *Vestnik UGATU*. 2016;20(3(73)):3–6. (In Russ.).
20. Akopyan T.K., Belov N.A., Lukyanchuk A.A., Letyagin N.V., Sviridova T.A., Petrova A.N., Fortuna A.S., Musin A.F. Effect of high pressure torsion on the precipitation hardening in Al–Ca–La based eutectic alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2021;802:140633. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140633>

Информация об авторах

Владимир Александрович Андреев – к.т.н., вед. науч. сотрудник Института металлургии и материаловедения (ИМЕТ) им. А.А. Байкова РАН.

<https://orcid.org/0000-0003-3937-1952>

E-mail: andreev.icmateks@gmail.com

Михаил Владимирович Горшенков – к.т.н., доцент кафедры физического материаловедения Национального исследовательского технологического университета (НИТУ) «МИСИС».

<https://orcid.org/0000-0001-8780-7584>

E-mail: mvg@misis.ru

Евгения Александровна Наумова – к.т.н., доцент кафедры обработки металлов давлением НИТУ МИСИС.

<https://orcid.org/0000-0002-4419-2943>

E-mail: jan73@mail.ru

Станислав Олегович Рогачев – д.т.н., доцент кафедры материаловедения и физики прочности НИТУ МИСИС.

<https://orcid.org/0000-0001-7769-7748>

E-mail: csaap@mail.ru

Information about the authors

Vladimir A. Andreev – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences.

<https://orcid.org/0000-0003-3937-1952>

E-mail: andreev.icmateks@gmail.com

Mikhail V. Gorshenkov – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor of the Department of physical materials science, National University of Science and Technology “MISIS” (NUST MISIS).

<https://orcid.org/0000-0001-8780-7584>

E-mail: mvg@misis.ru

Evgeniya A. Naumova – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor of the Department of metal forming, NUST MISIS.

<https://orcid.org/0000-0002-4419-2943>

E-mail: jan73@mail.ru

Stanislav O. Rogachev – Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor of the Department of physical metallurgy and physics of strength, NUST MISIS.

<https://orcid.org/0000-0001-7769-7748>

E-mail: csaap@mail.ru

Вклад авторов

В.А. Андреев – определение методологии, проведение экспериментов.

М.В. Горшенков – проведение электронно-микроскопического анализа, участие в обсуждении результатов.

Е.А. Наумова – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

С.О. Рогачев – определение цели работы, проведение экспериментов, написание статьи.

Contribution of the authors

V.A. Andreev – developed the methodology, performed the experiments.

M.V. Gorshenkov – conducted electron microscopy analysis, contributed to the discussion of results.

E.A. Naumova – defined the objectives of the work, contributed to the discussion of results.

S.O. Rogachev – defined the objectives of the work, performed the experiments, wrote the article.

Статья поступила в редакцию 28.06.2024, доработана 12.08.2024, подписана в печать 14.08.2024

The article was submitted 28.06.2024, revised 12.08.2024, accepted for publication 14.08.2024