

Влияние лазерной модификации поверхности на структуру и механические свойства эвтектических алюминиевых сплавов Al–8%Ca, Al–10%La, Al–10%Ce и Al–6%Ni

© 2022 г. С.О. Рогачев, Е.А. Наумова, А.А. Комиссаров, М.А. Васина,
М.Д. Павлов, А.А. Токарь

Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС», г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 13.04.2022 г., доработана 20.05.2022 г., подписана в печать 01.06.2022 г.

Аннотация: В настоящее время широко развивается аддитивное производство, включающее набор технологий изготовления изделий сложной формы с требуемым комплексом свойств. Большинство из них связаны с получением изделия путем плавления и сплавления частиц металлического порошка за счет лазерного излучения. Обладая превосходными литейными свойствами, эвтектические алюминиевые сплавы систем Al–Ca, Al–Ce, Al–La и Al–Ni могут быть перспективны для применения в аддитивных технологиях. Однако в литературе крайне мало информации о влиянии лазерной обработки на подобные структуры. В связи с этим в работе исследовали влияние лазерного излучения на структуру и механические свойства образцов из эвтектических составов, мас. %: Al–8%Ca, Al–10%La, Al–10%Ce и Al–6%Ni. Для этого осуществляли сплошную лазерную модификацию их поверхностей. Степень упрочнения оценивали с помощью измерения микротвердости модифицированной поверхности. Установлены механизмы разрушения образцов при испытании на растяжение. Показано, что в структуре модифицированной поверхности образцов всех четырех сплавов распределение второго компонента становится более однородным по сравнению со структурой основного металла. В образце Al–8%Ca наблюдался наибольший упрочняющий эффект, который, однако, способствует охрупчиванию при растяжении. Тем не менее модифицированный сплав Al–8%Ca представляет интерес из-за его повышенной твердости и, возможно, повышенной износостойкости. Напротив, лазерная модификация поверхностей образцов Al–10%Ce, Al–10%La и Al–6%Ni обеспечивает меньший упрочняющий эффект, но способствует повышению их прочности при растяжении с формированием вязкого или смешанного вязкохрупкого излома. Полученные результаты подтверждают перспективность использования сплавов систем Al–Ca, Al–Ce, Al–La и Al–Ni в аддитивном производстве.

Ключевые слова: эвтектические алюминиевые сплавы, системы Al–Ca, Al–Ce, Al–La, Al–Ni, лазерная модификация поверхности, структура, механические свойства.

Рогачев С.О. — канд. техн. наук, доцент кафедры металловедения и физики прочности, НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: csaar@mail.ru.

Наумова Е.А. — канд. техн. наук, доцент кафедры обработки металлов давлением, НИТУ «МИСиС». E-mail: jan73@mail.ru.

Комиссаров А.А. — канд. техн. наук, зав. лабораторией «Гибридные наноструктурные материалы», НИТУ «МИСиС». E-mail: komissarov@misis.ru.

Васина М.А. — аспирант, инженер кафедры обработки металлов давлением, НИТУ «МИСиС». E-mail: mariavasina90@gmail.com.

Павлов М.Д. — инженер инжинирингового центра прототипирования высокой сложности «Кинетика», НИТУ «МИСиС». E-mail: mkpavlov@gmail.com.

Токарь А.А. — специалист по учебно-методической работе кафедры металловедения и физики прочности, НИТУ «МИСиС». E-mail: tokarb2005@mail.ru.

Для цитирования: Рогачев С.О., Наумова Е.А., Комиссаров А.А., Васина М.А., Павлов М.Д., Токарь А.А. Влияние лазерной модификации поверхности на структуру и механические свойства эвтектических алюминиевых сплавов Al–8%Ca, Al–10%La, Al–10%Ce и Al–6%Ni. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2022. Т. 28. № 6. С. 58–70.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-6-58-70.

Effect of laser surface modification on the structure and mechanical properties of Al–8%Ca, Al–10%La, Al–10%Ce, and Al–6%Ni eutectic aluminum alloys

S.O. Rogachev, E.A. Naumova, A.A. Komissarov, M.A. Vasina, M.D. Pavlov, A.A. Tokar'

National University of Science and Technology (NUST) «MISIS», Moscow, Russia

Received 13.04.2022, revised 20.05.2022, accepted for publication 01.06.2022

Abstract: Additive manufacturing, which includes a set of technologies for manufacturing complex-shaped products with the required set of properties, is currently widely developed. Most additive technologies are associated with the manufacture of the product by melting and fusion of metal powder particles due to laser irradiation. Al–Ca, Al–Ce, Al–La, and Al–Ni eutectic aluminum alloys featuring excellent casting properties are supposedly promising for use in additive technologies. However, there is very little information on the effect of laser processing on such eutectic structures in the literature. In this regard, the paper investigated the effect of laser irradiation on the structure and mechanical properties of samples made of eutectic compositions, namely Al–8%Ca, Al–10%La, Al–10%Ce, and Al–6%Ni. This was achieved by continuous laser modification of their surfaces. The hardening level was evaluated by measuring the microhardness of the modified surface. The mechanisms of sample fracture under tensile testing were established. It was shown that the distribution of the second component in the structure of modified sample surfaces of all the four alloys becomes more uniform compared to the base metal structure. In the Al–8%Ca alloy, the greatest hardening effect was observed, which, however, contributes to embrittlement under tensile stress. However, the modified Al–8%Ca alloy is of interest because of its increased hardness and possibly increased wear resistance. On the contrary, laser modification of the Al–10%Ce, Al–10%La, and Al–6%Ni alloy sample surfaces provides a lower hardening effect, but increases their tensile strength with the formation of a ductile or mixed ductile-brittle fracture. The results obtained confirm the prospects of using the Al–Ca, Al–Ce, Al–La, and Al–Ni alloys in additive manufacturing.

Keywords: eutectic aluminum alloys, Al–Ca, Al–Ce, Al–La, Al–Ni systems, laser surface modification, structure, mechanical properties.

Rogachev S.O. — Cand. Sci. (Eng.), assistant professor of the Department of physical metallurgy and physics of strength, National University of Science and Technology (NUST) «MISIS» (119049, Russia, Moscow, Leninskiy pr., 4).
E-mail: csaap@mail.ru.

Naumova E.A. — Cand. Sci. (Eng.), assistant professor of the Department of metal forming, NUST «MISIS».
E-mail: jan73@mail.ru.

Komissarov A.A. — Cand. Sci. (Eng.), head of the Laboratory «Hybrid Nanostructured Materials», NUST «MISIS».
E-mail: komissarov@misis.ru.

Vasina M.A. — graduate student, engineer of the Department of metal forming, NUST «MISIS».
E-mail: mariavasina90@gmail.com.

Pavlov M.D. — engineer of the Center of prototyping of high complexity «Kinetics», NUST «MISIS».
E-mail: mkpavlov@gmail.com.

Tokar' A.A. — a specialist in educational and methodological work of the Department of physical metallurgy and physics of strength, NUST «MISIS». E-mail: tokarb2005@mail.ru.

For citation: Rogachev S.O., Naumova E.A., Komissarov A.A., Vasina M.A., Pavlov M.D., Tokar' A.A. Effect of laser surface modification on the structure and mechanical properties of Al–8%Ca, Al–10%La, Al–10%Ce, and Al–6%Ni eutectic aluminum alloys. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2022. Vol. 28. No. 6. P. 58–70 (In Russ.).
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-6-58-70.

Введение

С начала 2000-х годов широкое распространение получили процессы 3D-печати (аддитивные технологии) [1–5]. Они включают в себя технологические методы производства, основанные на поэтапном формировании изделия или прототипа путем добавления материала на основу. Наиболее часто аддитивные процессы реализуются за счет использования лазерного излучения для плавления и сплавления частиц металлического порошка. В сравнении с классическими технологиями производства (литье, прокатка, штамповка и пр.) металлические объекты, полученные аддитивными методами, по эксплуатационным

характеристикам пока во многом уступают традиционным.

Тем не менее аддитивное производство имеет предпосылки стать важной технологией получения изделий сложной формы с требуемым комплексом свойств, радикально изменив привычные методы организации производственного процесса [6, 7]. Аддитивное производство позволяет легко масштабировать идеи от прототипа до полномасштабного производственного процесса. Топологическая оптимизация, бионический дизайн и другие инновационные подходы позволяют снижать вес конструкций в несколько раз, что особенно це-

няется в аэрокосмической области. Себестоимость металлических изделий, полученных аддитивными методами, будет неуклонно снижаться, так как ежегодно разрабатываются новые технологические и конструкторские решения, появляются новые производственные подходы.

Сегодня алюминиевые сплавы остаются популярными конструкционными материалами, поскольку они способны существенно снизить массу изделия или конструкции [8]. Для 3D-печати широко используются порошки литейных эвтектических сплавов на основе системы Al—Si, таких как AlSi10Mg, AlSi12, AlSi7Mg0,6, AlSi9Cu3 и некоторые другие [9—13]. Исследования показывают, что лазерное воздействие на алюминий и его сплавы позволяет заметно повысить их прочность и улучшить комплекс свойств в целом по сравнению с металлом, производимым традиционным способом [14—18]. Это связано с переходом материала в неравновесное состояние из-за сверхбыстрой скорости охлаждения и циклического теплового эффекта при лазерном воздействии [19—22]. Повышение прочности всегда актуально для материалов конструкционного назначения. В ряде работ отмечается улучшение коррозионных свойств сплавов после лазерной обработки [23, 24].

Несмотря на превосходные литейные характеристики Al—Si-сплавов, у них есть ряд существенных недостатков, в первую очередь — хрупкость. Поэтому создание новых алюминиевых сплавов с улучшенным комплексом физико-механических свойств, а также методов управления этими свойствами является актуальной задачей. Разработанные в последние годы эвтектические сплавы системы Al—Ca могут быть рассмотрены как альтернатива Al—Si-сплавам [25]. Они обладают средним уровнем прочности в ряду алюминиевых сплавов, но высокотехнологичны при литье, поскольку имеют узкие интервалы кристаллизации, а в отожженном состоянии, в отличие от Al—Si-сплавов, легко деформируются, несмотря на высокую долю интерметаллидных фаз в структуре [26, 27]. Кроме этого, в мире существует интерес к алюминиевым сплавам, легированным никелем, а также редкоземельными металлами (Ce, La и др.), поскольку они образуют с алюминием эвтектические системы, могут иметь повышенные рабочие температуры и использоваться для двигателестроения [28—30].

Благодаря превосходным литейным свойствам рассмотренные выше алюминиевые сплавы, осо-

бенно сплавы эвтектического состава, потенциально перспективны для применения в аддитивных технологиях. Однако в литературе крайне мало информации о влиянии лазерной обработки на подобные структуры. На практике упрочняющий эффект лазерного воздействия удобно изучать, осуществляя сплошную лазерную обработку поверхности образца, тем самым создавая условия, близкие к условиям 3D-печати. Поэтому целью работы было исследование влияния лазерной обработки (модификации) поверхности на структуру и механические свойства образцов эвтектических сплавов составов, мас. %: Al—8%Ca, Al—10%La, Al—10%Ce и Al—6%Ni.

Материалы и методика исследования

Алюминиевые сплавы Al—8%Ca, Al—10%Ce, Al—10%La и Al—6%Ni были получены в виде отливок диаметром 20 мм и длиной 200 мм. Исследования проводили на пластинах высотой ~5 мм, которые получали из отливки электроискровым методом.

Сплошную модификацию плоской поверхности пластин проводили с помощью установки SLM Solutions 280HL («SLM Solutions», Германия) в следующем режиме: мощность импульсного лазера — 370 Вт, длина волны — 1070 нм, частота ~15 кГц, диаметр сфокусированного пучка — 80 мкм, скорость сканирования — 750 мм/с, плотность мощности на поверхность ~49 Вт/см².

Для дальнейших исследований полученные пластины резали с использованием электроэрозионного станка на более тонкие пластины в соответствии с рис. 1. Таким образом, одна из отрезанных пластин представляла собой основной металл (подложку) с модифицированной поверхностью, а другая — только основной металл. Далее из них с использованием электроэрозионного станка вырезали миниатюрные разрывные образцы толщиной 0,25—0,28 мм, длиной и шириной рабочей части 5,0 и 1,45 мм соответственно. Из пластин с модифицированной поверхностью разрывные образцы вырезали вдоль и поперек направления наплавки, а из пластин основного металла — в произвольном направлении. Испытание на растяжение проводили при комнатной температуре с помощью испытательной машины INSTRON 5966 («Instron», США) и специальных переходников. Испытывали по 2 образца на точку.

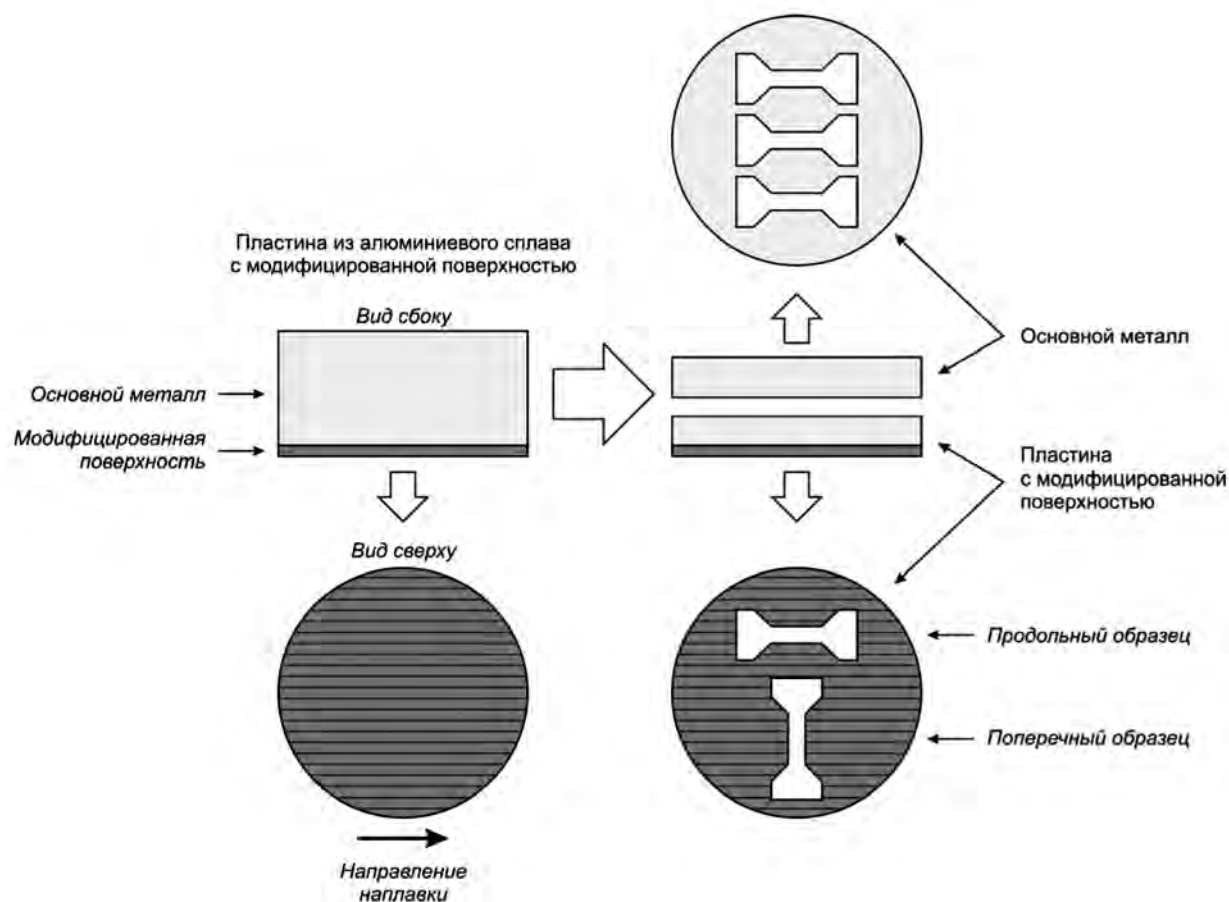


Рис. 1. Схема получения образцов для механических испытаний

Fig. 1. Diagram of mechanical test sample preparation

Для оценки упрочняющего эффекта лазерного воздействия измеряли микротвердость по Виккерсу (нагрузка 0,5 Н, время выдержки 10 с) модифицированной поверхности и основного металла, используя микротвердомер Micromet 5101 («Buehler», Германия). Осуществляли по 10 измерений случайным образом с последующим расчетом среднего арифметического значения и среднеквадратического отклонения.

Поверхность образцов, а также микроструктуру поперечных шлифов изучали на оптическом микроскопе Axio Scope A1 («Carl Zeiss», Германия). Предварительно поперечные шлифы травили в 5 %-ном растворе плавиковой кислоты.

Для проведения микроанализа и построения карт распределения элементов на поперечных шлифах использовали сканирующий электронный микроскоп TESCAN VEGA 3 (Чехия), укомплектованный энергодисперсионной приставкой-микроанализатором INCA Energy 15013 X-act

(«Oxford Instruments», Великобритания) с детектором X-act ADD и программным обеспечением INCA Energy. Фотографии микроструктуры получали в режиме отраженных электронов (BSE). Этот же прибор использовали для анализа изломов разрывных образцов в режиме вторичных электронов (SE).

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 показаны поверхности модифицированных образцов алюминиевых сплавов, исследованные с помощью оптической микроскопии. Видны параллельные лазерные проплавы одинаковой ширины — около 100 мкм.

На рис. 3 представлены поперечные сечения образцов алюминиевых сплавов с модифицированной поверхностью. Видно, что структура наплавленного слоя (верхняя часть изображения) отличается от структуры основного металла

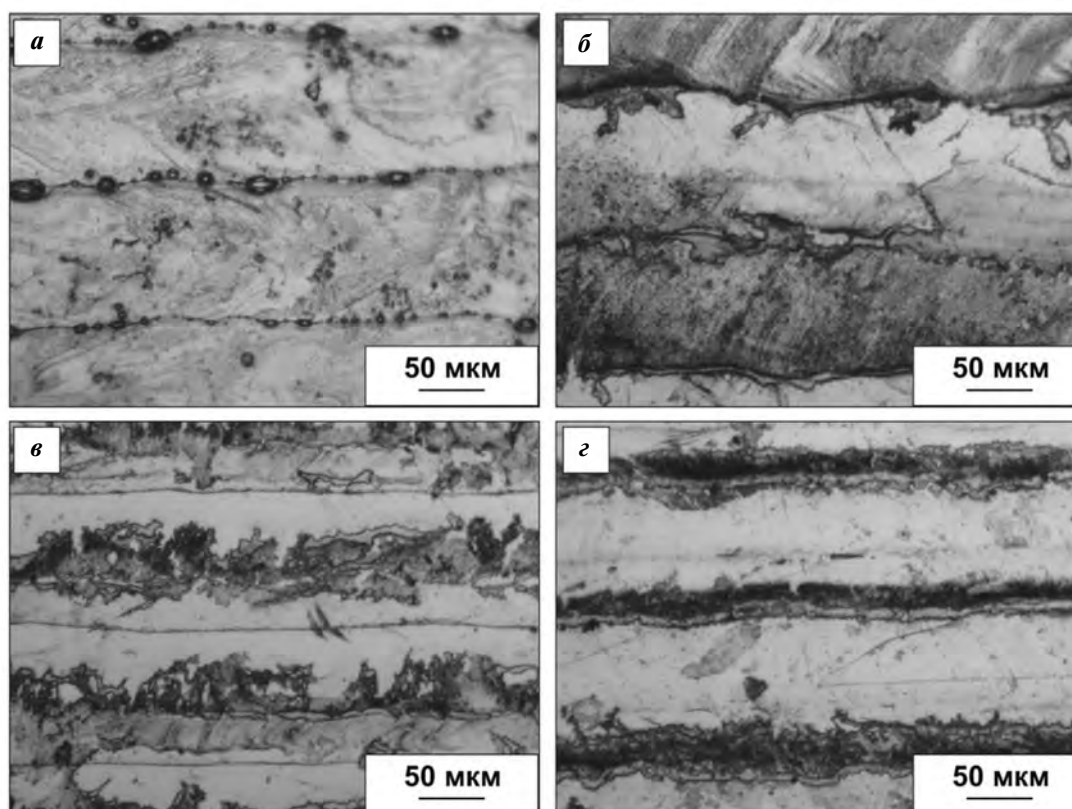


Рис. 2. Модифицированная поверхность образцов алюминиевых сплавов (ОМ)

a – Al–8%Ca, *б* – Al–10%Ce, *в* – Al–10%La и *з* – Al–6%Ni

Fig. 2. Modified surface of aluminum alloy samples (optical microscopy)

a – Al–8%Ca, *б* – Al–10%Ce, *в* – Al–10%La and *з* – Al–6%Ni

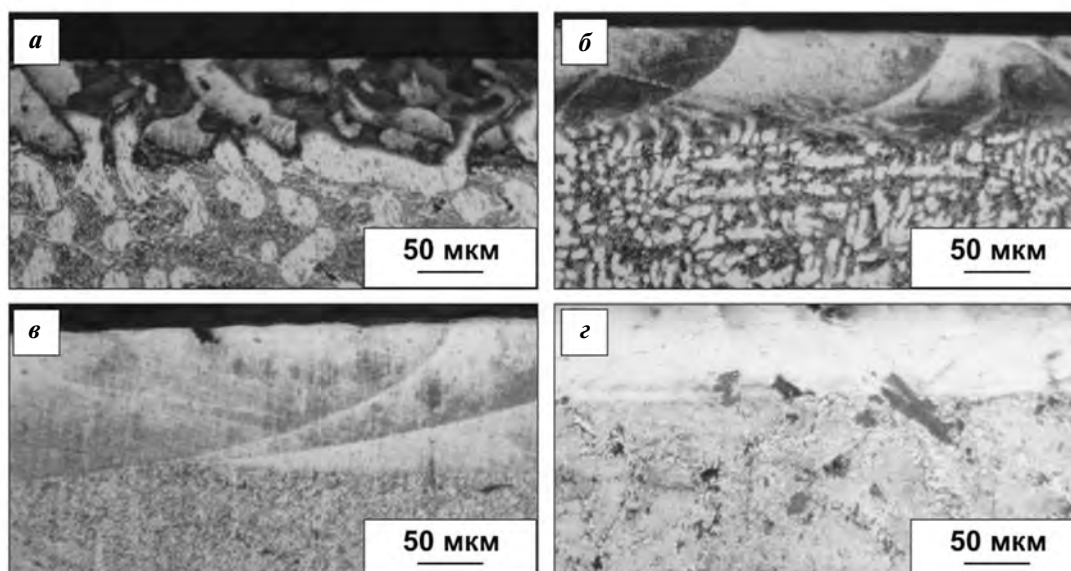


Рис. 3. Поперечное сечение образцов алюминиевых сплавов с модифицированной поверхностью (ОМ)

a – Al–8%Ca, *б* – Al–10%Ce, *в* – Al–10%La и *з* – Al–6%Ni

Fig. 3. Cross section of aluminum alloy samples with a modified surface (optical microscopy)

a – Al–8%Ca, *б* – Al–10%Ce, *в* – Al–10%La and *з* – Al–6%Ni

(нижняя часть), где наблюдаются ветви дендритов алюминия и эвтектика разной дисперсности. Наиболее крупные дендриты выявлены в структуре сплава Al–8%Ca (рис. 2, а), а более мелкие — Al–10%Ce (рис. 2, б). Структура образцов Al–10%La и Al–6%Ni оптическим микроскопом не разрешается (рис. 2, в, г). Средняя толщина наплавленного слоя для сплавов Al–8%Ca, Al–10%Ce, Al–10%La и Al–6%Ni составила 62 ± 8 , 90 ± 9 , 70 ± 10 и 128 ± 9 мкм соответственно.

Более детальные изображения структуры образцов алюминиевых сплавов с модифицированной поверхностью, полученные методом сканирующей электронной микроскопии, показаны на рис. 4. В левой части изображений видна модифицированная поверхность, в правой — основной металл. Структура основного металла всех четырех сплавов неоднородна и представляет собой совокупность дендритов алюминия и эвтектики. Хорошо видно тонкодисперсное строение эвтектики в

образцах Al–10%La и Al–6%Ni (рис. 4, в, г). В то же время структура модифицированной поверхности всех четырех сплавов является преимущественно однородной, четко просматриваются отдельные зоны плавления с типичной эллиптической формой (кроме образца Al–6%Ni, структура модифицированной поверхности которого выглядит полностью однородной).

На концентрационных картах распределения химических элементов в поперечном сечении образцов (рис. 5) видно неравномерное распределение второго компонента в структуре основного металла, за исключением сплава Al–10%La, в структуре которого распределение лантана является однородным из-за очень дисперсной эвтектики.

Следует отметить, что наряду с такой же дисперсной эвтектикой в структуре сплава Al–6%Ni присутствуют и очень крупные (до 50 мкм) первичные кристаллы Al_3Ni в форме грубых пластин

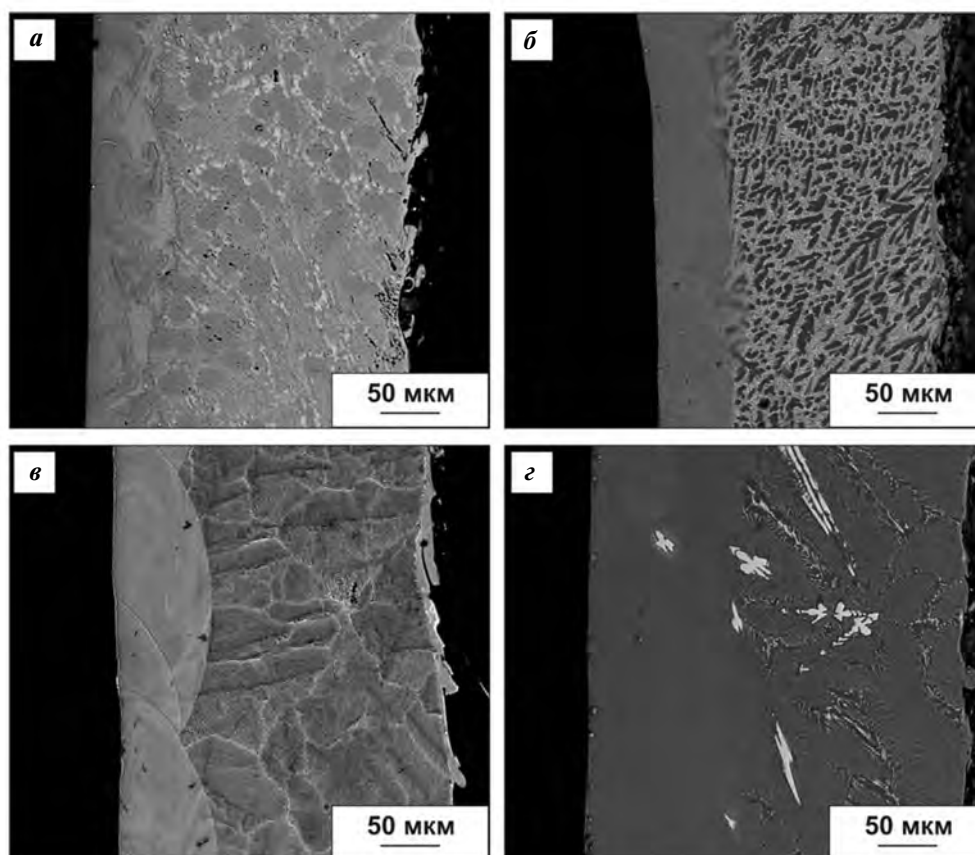


Рис. 4. Поперечное сечение образцов алюминиевых сплавов с модифицированной поверхностью (СЭМ)

а — Al–8%Ca, б — Al–10%Ce, в — Al–10%La и г — Al–6%Ni

Fig. 4. Cross section of aluminum alloy samples with a modified surface (scanning electron microscopy)

а — Al–8%Ca, б — Al–10%Ce, в — Al–10%La and г — Al–6%Ni

и многогранников. В то же время в структуре модифицированной поверхности образцов всех четырех сплавов распределение второго компонента становится преимущественно однородным.

Микротвердость модифицированной поверхности образцов всех четырех сплавов выше, чем у основного металла (табл. 1).

Механические свойства образцов исследуемых

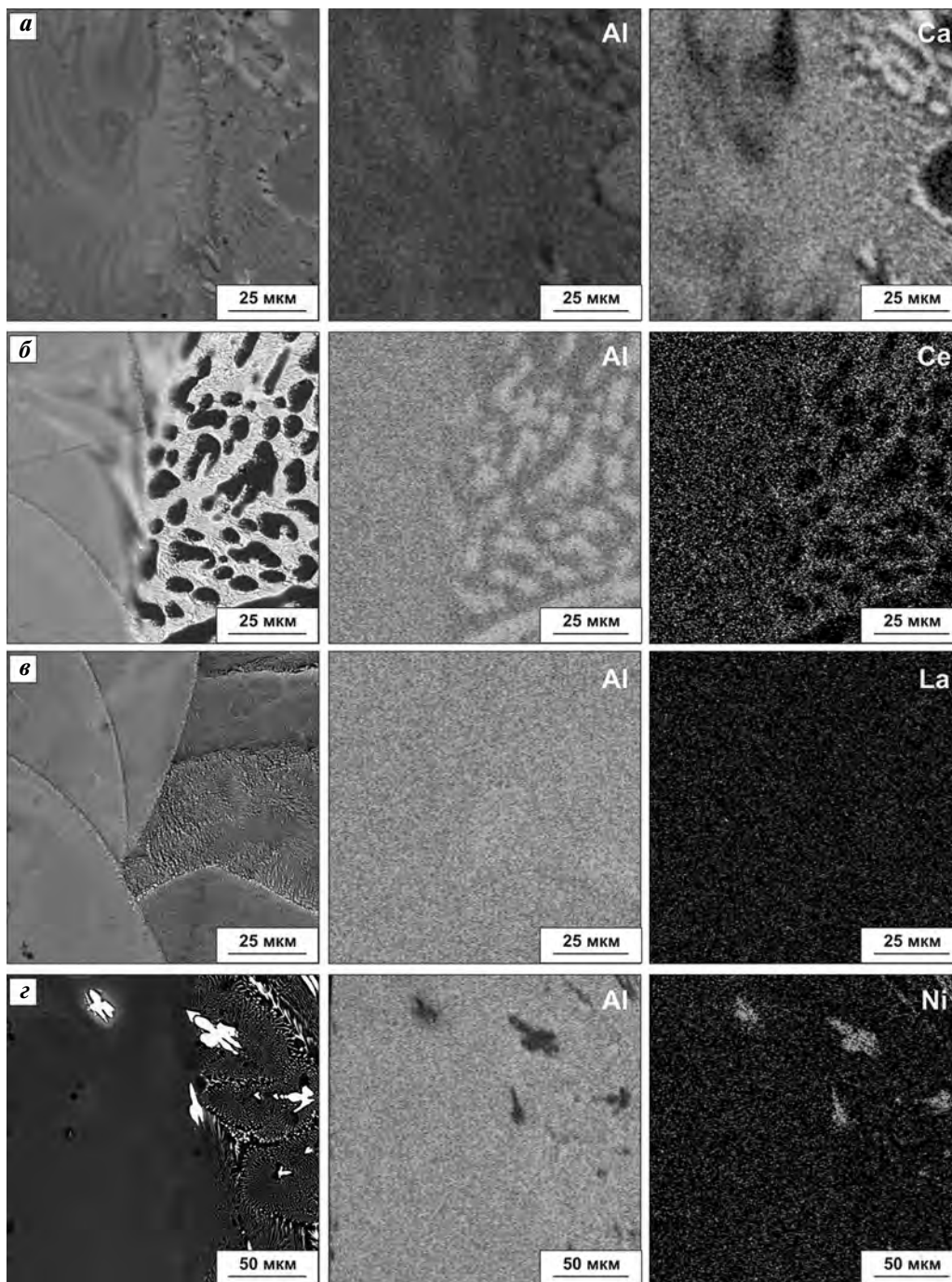


Рис. 5. Структура (СЭМ) и концентрационные карты распределения химических элементов в поперечном сечении образцов алюминиевых сплавов с модифицированной поверхностью

a – Al–8%Ca, *б* – Al–10%Ce, *в* – Al–10%La и *з* – Al–6%Ni

Fig. 5. Structure (scanning electron microscopy) and concentration distribution maps of chemical elements in the cross section of aluminum alloy samples with a modified surface

a – Al–8%Ca, *б* – Al–10%Ce, *в* – Al–10%La and *з* – Al–6%Ni

Таблица 1. Микротвердость исследуемых сплавов и упрочняющий эффект (относительный прирост твердости) лазерного воздействия

Table 1. Microhardness of samples studied and hardening effect (relative hardness gain) of laser irradiation

Сплав	Микротвердость, HV		Относительный прирост твердости
	Осн. металл	Мод. пов-ть	
Al–8%Ca	86±3	228±27	2,6
Al–10%Ce	48±3	80±9	1,7
Al–10%La	61±3	94±3	1,5
Al–6%Ni	59±3	133±12	2,2

Таблица 2. Усредненные значения механических свойств алюминиевых сплавов до и после модификации поверхности

Table 2. Averaged values of aluminum alloy mechanical properties before and after surface modification

Сплав	Ориентация образца	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	σ_s^* , МПа
Al–8%Ca	Литой	157	159	1,3	—
	Продольный	171	180	1,2	206
	Поперечный	154	171	1,2	143
Al–10%Ce	Литой	80	120	6,9	—
	Продольный	137	171	4,4	245
	Поперечный	112	114	3,1	175
Al–10%La	Литой	142	159	3,9	—
	Продольный	182	197	3,4	287
	Поперечный	149	158	1,5	166
Al–6%Ni	Литой	83	134	3,3	—
	Продольный	180	221	1,9	281
	Поперечный	147	225	1,3	213
* Рассчитанный по уравнению (2) предел текучести модифицированной поверхности.					

алюминиевых сплавов до и после модификации поверхности приведены в табл. 2. Видно, что лазерная обработка поверхности оказала различное влияние на изменение их механических характеристик (замечим, что количественная оценка изменения механических показателей связана с погрешностью из-за несколько разной толщины разрывных образцов).

Так, для сплава Al–8%Ca не выявлено ярко выраженного влияния на изменение прочности как продольных, так и поперечных образцов. Для сплава Al–10%La модификация поверхности привела к повышению предела текучести (на 30 %) и предела прочности (на 25 %) продольного образца и не изменила их значения у поперечного. Напротив, для сплавов Al–10%Ce и Al–6%Ni модификация поверхности привела к ярко выраженному

(в 1,4–1,7 и 1,8–2,2 раза соответственно) повышению предела текучести как продольного, так и поперечного образцов. В то же время для сплава Al–10%Ce обработка поверхности привела к повышению предела прочности продольного образца (в 1,4 раза) и не изменила его у поперечного, а у сплава Al–6 %Ni предел прочности увеличился (в 1,6 раза) как у продольного, так и у поперечного образцов. Для всех четырех модифицированных сплавов предел текучести продольного образца выше, чем поперечного, а предел прочности превышает или сопоставим с пределом прочности поперечного образца (табл. 3).

Лазерная модификация поверхности либо не оказала влияния на относительное удлинение (для сплава Al–8%Ca), либо привела к его снижению (Al–10%Ce, Al–10%La и Al–6%Ni). Для

Таблица 3. Результаты сравнения механических свойств алюминиевых сплавов после модификации поверхности в продольном и поперечном направлениях

Table 3. Results of comparing aluminum alloy mechanical properties after surface modification in longitudinal and transverse directions

Сплав	Отношение значений механических свойств продольных и поперечных образцов			
	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	σ_s
Al–8%Ca	1,11	1,05	1,00	1,16
Al–10%Ce	1,22	1,5	1,42	1,39
Al–10%La	1,22	1,25	2,27	1,37
Al–6%Ni	1,22	0,98	1,46	1,35

модифицированных сплавов относительное удлинение продольного образца сопоставимо (для сплава Al–8%Ca) или ниже (Al–10%Ce, Al–10%La и Al–6%Ni) относительного удлинения поперечного образца.

Очевидно, что образец с модифицированной поверхностью можно представить как двухслойный композит. В этом случае его предел текучести можно рассчитать по правилу аддитивности в соответствии с уравнением

$$\sigma = \sigma_s h_s + \sigma_m h_m, \quad (1)$$

где σ_s и h_s — предел текучести и отношение толщины модифицированного слоя к толщине образца; σ_m и h_m — предел текучести и отношение толщины основного металла к толщине образца.

Тогда предел текучести модифицированного слоя можно рассчитать как

$$\sigma_s = (\sigma - \sigma_m h_m) / h_s. \quad (2)$$

Полученные результаты для четырех сплавов приведены в табл. 2. Видно, что для сплава Al–8%Ca предел текучести модифицированной поверхности продольного образца по сравнению с основным металлом выше (на 30 %), а поперечного — даже немного ниже. Для сплава Al–10%La предел текучести модифицированной поверхности продольного образца выше (в 2 раза), чем у основного металла, а поперечного — сопоставим с ним. Напротив, для сплавов Al–10%Ce и Al–6%Ni предел текучести модифицированной поверхности как продольного, так и поперечного образцов многократно (в 2,2–3,1 и 2,6–3,4 раза,

соответственно) выше по сравнению с основным металлом. При этом предел текучести модифицированной поверхности продольных образцов всех четырех сплавов выше, чем поперечных.

Изображения поверхностей изломов разрывных образцов четырех алюминиевых сплавов с модифицированной поверхностью, полученные методом сканирующей электронной микроскопии, показаны на рис. 6. Видно, что разрушение модифицированного слоя образца сплава Al–8%Ca происходит по механизму скола (рис. 6, а, б), что указывает на сильную охрупченность слоя. Можно предположить, что при растяжении образца в модифицированном слое происходит раннее трещинообразование, что объясняет его низкую прочность и отсутствие вклада в упрочнение образца. Поверхность разрушения образца сплава Al–10%Ce в области модифицированного слоя имеет относительно развитый рельеф, что свидетельствует о наличии пластической деформации (рис. 6, в, г). Поверхность разрушения образца сплава Al–10%La в модифицированном слое преимущественно плоская, однако микромеханизм разрушения — вязкий, мелкоячеистый (рис. 6, д, е). В области основного металла сплава Al–10%La наблюдаются значительная утяжка и однородный вязкий ячеистый излом. Поверхность разрушения образца сплава Al–6 %Ni в модифицированном слое смешанная: встречаются области как хрупкого разрушения по механизму скола, так и вязко-ячеистого (рис. 6, ж, з).

Упрочняющий эффект лазерного воздействия может быть связан с формированием пересыщенного твердого раствора и/или измельчением эвтектических частиц в структуре модифицированной поверхности [31]. Согласно полученным результатам, лазерная обработка поверхности эвтектических алюминиевых сплавов оказывает различный упрочняющий эффект в зависимости от типа эвтектики.

Так, для сплава Al–8%Ca достигнуты наибольшие упрочняющий эффект и микротвердость модифицированной поверхности, что, однако, привело к охрупчиванию и раннему трещинообразованию образца при растяжении. Напротив, меньшие упрочняющий эффект и микротвердость модифицированной поверхности в сплавах Al–10%Ce, Al–10%La и Al–6%Ni способствовали повышению их прочности при растяжении. При этом механизм разрушения модифицированных образцов отличался. В изломах сплава Al–10 %La

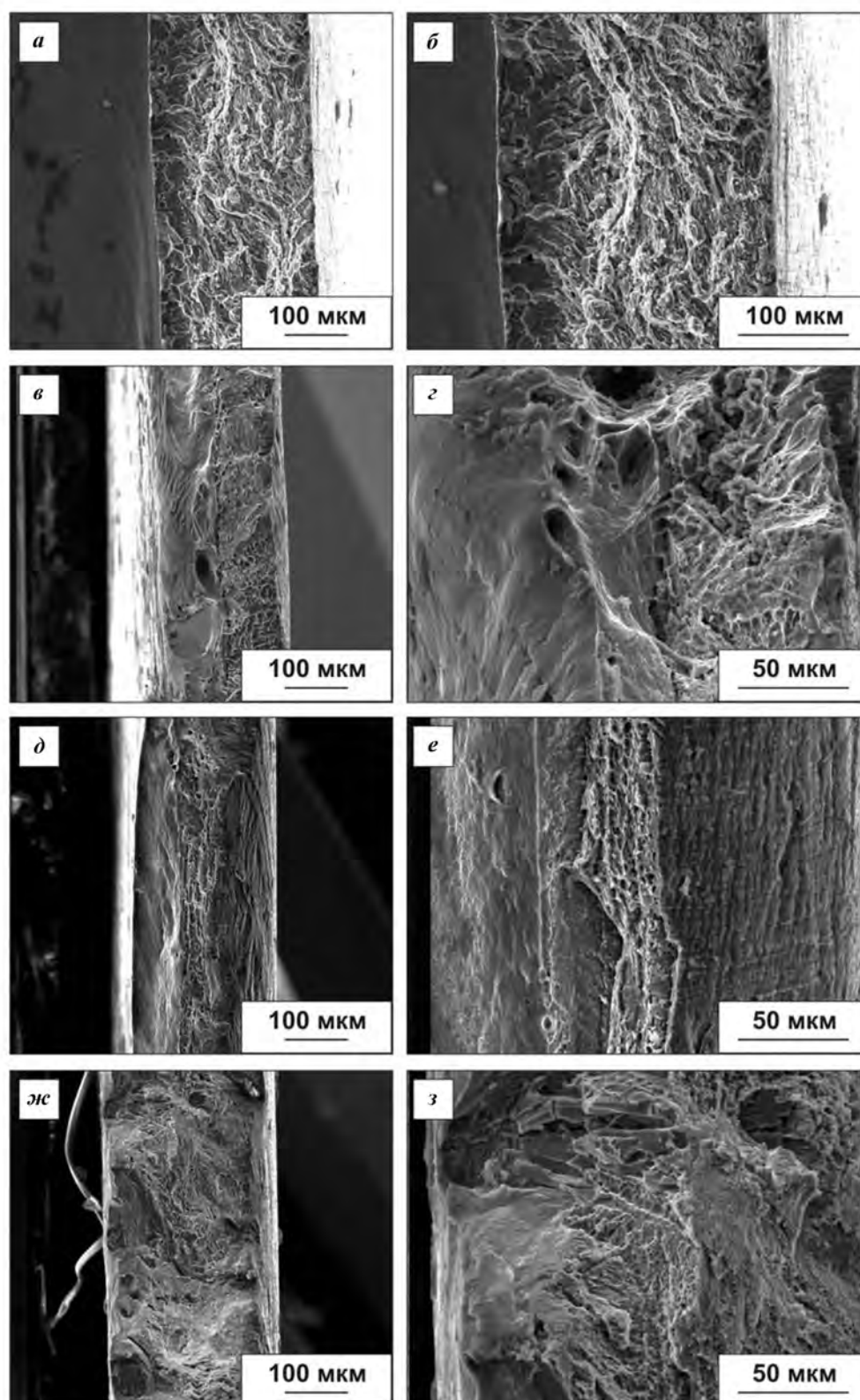


Рис. 6. Поверхности изломов разрывных образцов модифицированных алюминиевых сплавов (СЭМ)
a, б – Al–8%Ca; *в, з* – Al–10%Ce; *д, е* – Al–10%La; *ж, з* – Al–6%Ni

Fig. 6. Fracture surfaces of modified aluminum alloy tensile samples (scanning electron microscopy)
a, б – Al–8%Ca; *в, з* – Al–10%Ce; *д, е* – Al–10%La; *ж, з* – Al–6%Ni

с наименьшим упрочняющим эффектом присутствовала в основном вязкоямоочная составляющая, а в сплаве Al—6%Ni с наибольшим упрочняющим эффектом в изломах велика доля хрупкой составляющей (из-за наличия очень крупных первичных хрупких частиц).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что сплошная лазерная модификация поверхности перспективна для упрочнения эвтектических сплавов систем Al—Ca, Al—Ce, Al—La и Al—Ni. Однако практическое применение такого упрочнения различно. Сплав Al—8%Ca с лазерной модификацией поверхности по данному режиму, по-видимому, представляет интерес с точки зрения повышенной износостойкости. В то же время лазерная модификация сплавов Al—Ce, Al—La и Al—Ni позволяет увеличить их ресурс как конструкционных материалов, работающих в условиях нагружения. Следует еще раз отметить, что при лазерном воздействии на поверхность сплавов создаются условия, близкие к условиям лазерной 3D-печати. Поэтому все четыре сплава представляют несомненный интерес для применения в аддитивных технологиях.

Выводы

По результатам исследования влияния сплошной лазерной модификации поверхности на структуру и механические свойства эвтектических алюминиевых сплавов Al—8%Ca, Al—10%La, Al—10%Ce и Al—6%Ni сделаны следующие выводы.

1. Средняя толщина наплавленного слоя при одинаковых параметрах обработки для сплавов Al—8%Ca, Al—10%Ce, Al—10%La и Al—6%Ni составила 62 ± 8 , 90 ± 9 , 70 ± 10 и 128 ± 9 мкм соответственно. В структуре модифицированной поверхности образцов всех четырех сплавов распределение второго компонента становится более однородным по сравнению с распределением в основном металле за счет сильного диспергирования структуры.

2. В сплаве Al—8%Ca наблюдается наибольший упрочняющий эффект (в 2,6 раза), который, однако, способствует охрупчиванию образца при растяжении. Тем не менее модифицированный сплав Al—8%Ca представляет интерес из-за повышенной твердости, которая коррелирует с износостойкостью. Напротив, лазерная модификация поверхностей образцов Al—10%Ce, Al—10%La и

Al—6%Ni обеспечивает меньший упрочняющий эффект (в 1,5—2,2 раза), но способствует повышению их прочности при растяжении с формированием вязкого или смешанного вязкохрупкого излома.

Таким образом, полученные результаты подтверждают перспективность использования сплавов систем Al—Ca, Al—Ce, Al—La и Al—Ni в аддитивном производстве.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 20-19-00746).

Исследование структуры выполнено на оборудовании ЦКП «Материаловедение и металлургия» при финансовой поддержке в лице Минобрнауки РФ (№ 075-15-2021-696).

Acknowledgments. *This research was funded by the Russian Science Foundation (Grant No. 20-19-00746).*

The structure was studied at the Materials Science and Metallurgy common use center equipment under the sponsorship of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (No. 075-15-2021-696).

Литература/References

1. Zafar M.Q., Zhao H. 4D Printing: Future insight in additive manufacturing. *Met. Mater. Int.* 2019. Vol. 26. P. 564—585. DOI: 10.1007/s12540-019-00441-w.
2. Read N., Wang W., Essa K., Attallah M.M. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimization and mechanical properties development. *Mater. Design.* 2015. Vol. 65. P. 417—424. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.09.044.
3. Гаршев А.В., Козлов Д.А., Евдокимов П.В., Филиппов Я.Ю., Орлов Н.К., Путляев В.И., Четвертухин А.В., Петров А.К. Анализ порошков алюминиевых сплавов, изготовленных распылением расплавов и предназначенных для производства изделий методами аддитивных технологий. *Материаловедение.* 2018. No. 12. С. 12—16. DOI: 10.31044/1684-579X-2018-0-12-12-16.
- Garshiev A.V., Kozlov D.A., Evdokimov P.V., Filippov Y.Y., Orlov N.K., Putlyaev V.I., Chetvertukhin A.V., Petrov A.K. Analysis of aluminum alloy powders for additive manufacturing fabricated by atomization. *Inorg. Mater.: Appl. Res.* 2019. Vol. 10. P. 901—905. DOI: 10.1134/S2075113319040130.
4. Попкова И.С., Золоторевский В.С., Солонин А.Н. Производство изделий из алюминия и его сплавов методом селективного лазерного плавления. *Технология легких сплавов.* 2015. No. 4. С. 14—24.
- Popkova I.S., Zolotarevskij V.S., Solonin A.N. Production of products from aluminum and its alloys by selective

- laser melting. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2015. No. 4. P. 14–24 (In Russ.).
5. Galy C., Le Guen E., Lacoste E., Arvieu C. Main defects observed in aluminum alloy parts produced by SLM: From causes to consequences. *Addit. Manuf.* 2018. Vol. 22. P. 165–175. DOI: 10.1016/j.addma.2018.05.005.
 6. Gromov A.A., Nalivaiko A.Yu., Ambaryan G.N., Vlaskin M.S., Buryakovskaya O.A., Kislenko S.A., Zhuk A.Z., Shkolnikov E.I., Slyusarskiy K.V., Osipenkova A.A., Arnautov A.N. Aluminum–alumina composites: Pt. I. Obtaining and characterization of powders. *Materials*. 2019. Vol. 12. P. 3180. DOI: 10.3390/ma12193180.
 7. Кубанова А.Н., Сергеев А.Н., Добровольский Н.М., Гвоздев А.Е., Медведев П.Н., Малий Д.В. Особенности материалов и технологий аддитивного производства изделий. *Чебышевский сборник*. 2020. Т. 20. No. 3. С. 453–477.
Kubanova A.N., Sergeev A.N., Dobrovol'skiy N.M., Gvozdev A.E., Medvedev P.N., Malij D.V. Features of materials and technologies for additive manufacturing of products. *Chebyshevskij sbornik*. 2020. Vol. 20. No. 3. P. 453–477 (In Russ.).
 8. Rogachev S.O., Naumova E.A., Vasileva E.S., Magurina M.Yu., Sundeev R.V., Veligzhanin A.A. Structure and mechanical properties of Al–Ca alloys processed by severe plastic deformation. *Mater. Sci. Eng. A*. 2019. Vol. 767. P. 138410. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138410.
 9. Marola S., Manfredi D., Fiore G., Poletti M.G., Lombardi M., Fino P., Battezzati L. A comparison of Selective Laser melting with bulk rapid solidification of AlSi₁₀Mg alloy. *J. Alloys. Compd.* 2018. Vol. 742. P. 271–279. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.01.309.
 10. Liu X., Zhao C., Zhou X., Shen Z., Liu W. Microstructure of selective laser melted AlSi₁₀Mg alloy. *Mater. Design*. 2019. Vol. 168. P. 107677. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107677.
 11. Maskery I., Aboulkhair N.T., Aremu A.O., Tuck C.J., Ashcroft I.A., Wildman R.D., Hague R.J.M. A mechanical property evaluation of graded density Al–Si₁₀–Mg lattice structures manufactured by selective laser melting. *Mater. Sci. Eng. A*. 2016. Vol. 670. P. 264–274. DOI: 10.1016/j.msea.2016.06.013.
 12. Zhu S., Song S., Chen Y., Zhao F., Yang W., Li Z., Shi Y., Yu S. Effect of in-situ Al₂O₃ on tensile strength and ductility of AlSi₁₀Mg alloy fabricated by selective laser melting. *Mater. Lett.* 2022. Vol. 308. P. 131108. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131108.
 13. Takata N., Kodaira H., Sekizawa K., Suzuki A., Kobashi M. Change in microstructure of selectively laser melted AlSi₁₀Mg alloy with heat treatments. *Mater. Sci. Eng. A*. 2017. Vol. 704. P. 218–228. DOI: 10.1016/j.msea.2017.08.029.
 14. Al-Saedi D.S.J., Masood S.H., Faizan-Ur-Rab M., Alomarah A., Ponnusamy P. Mechanical properties and energy absorption capability of functionally graded F2BCC lattice fabricated by SLM. *Mater. Design*. 2018. Vol. 144. P. 32–44. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.01.059.
 15. Nalivaiko A.Y., Ozherelkov D.Y., Arnautov A.N., Zmanovsky S.V., Osipenkova A.A., Gromov A.A. Selective laser melting of aluminum–alumina powder composites obtained by hydrothermal oxidation method. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.* 2020. Vol. 126. No. 11. P. 871. DOI: 10.1007/s00339-020-04029-9.
 16. Li X.P., Wang X.J., Saunders M., Suvorova A., Zhang L.C., Liu Y.J., Fang M.H., Huang Z.H., Sercombe T.B. A selective laser melting and solution heat treatment refined Al–12Si alloy with a controllable ultrafine eutectic microstructure and 25 % tensile ductility. *Acta Mater.* 2015. Vol. 95. P. 74–82. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.05.017.
 17. Zhang C., Zhu H., Liao H., Cheng Y., Hu Z., Zeng X. Effect of heat treatments on fatigue property of selective laser melting AlSi₁₀Mg. *Int. J. Fatigue*. 2018. Vol. 116. P. 513–522. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.07.016.
 18. Rao J.H., Zhang Y., Fang X., Chen Y., Wu X., Davies C.H.J. The origins for tensile properties of selective laser melted aluminium alloy A357. *Addit. Manuf.* 2017. Vol. 17. P. 113–122. DOI: 10.1016/j.addma.2017.08.007.
 19. Takata N., Liu M., Kodaira H., Suzuki A., Kobashi M. Anomalous strengthening by supersaturated solid solutions of selectively laser melted Al–Si-based alloys. *Addit. Manuf.* 2020. Vol. 33. P. 101152. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101152.
 20. Liu Y., Wang Y., Wu X., Shi J. Nonequilibrium thermodynamic calculation and experimental investigation of an additively manufactured functionally graded material. *J. Alloys. Compd.* 2020. Vol. 838. P. 155322. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.155322.
 21. Marola S., Manfredi D., Fiore G., Poletti M.G., Lombardi M., Fino P., Battezzati L. A comparison of selective laser melting with bulk rapid solidification of AlSi₁₀Mg alloy. *J. Alloys. Compd.* 2018. Vol. 742. P. 271–279. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.01.309.
 22. Liu Y.J., Liu Z., Jiang Y., Wang G.W., Yang Y., Zhang L.C. Gradient in microstructure and mechanical property of selective laser melted AlSi₁₀Mg. *J. Alloys. Compd.* 2018. Vol. 735. P. 1414–1421. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.11.020.
 23. Yang Y., Chen Y., Zhang J., Gu X., Qin P., Dai N., Li X., Kruth J.-P., Zhang L.-C. Improved corrosion behavior of ultrafine-grained eutectic Al–12Si alloy produced

- by selective laser melting. *Mater. Des.* 2018. Vol. 146. P. 239–248. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.03.025.
24. Gharbi O., Jiang D., Feenstra D.R., Kairy S.K., Wu Y., Hutchinson C.R., Birbilis N. On the corrosion of additively manufactured aluminium alloy AA2024 prepared by selective laser melting. *Corros. Sci.* 2018. Vol. 143. P. 93–106. DOI: 10.1016/j.corsci.2018.08.019.
 25. Belov N.A., Naumova E.A., Alabin A.N., Matveeva I.A. Effect of scandium on structure and hardening of Al–Ca eutectic alloys. *J. Alloys. Compd.* 2015. Vol. 646. P. 741–747. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.05.155.
 26. 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 теплого равноканального углового прессования. *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2021. Т. 27. No. 2. С. 56–65. DOI: 10.17073/0021-3438-2021-2-56-65.
Rogachev S.O., Naumova E.A., Karelin R.D., Andreiev 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. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2021. Vol. 62. No. 3. P. 293–301. DOI: 10.3103/S1067821221030123.
 27. Belov N.A., Batyshev K.A., Doroshenko V.V. Microstructure and phase composition of the eutectic Al–Ca alloy, additionally alloyed with small additives of zirconium, scandium and manganese. *Non-Ferr. Met.* 2017. No. 2. P. 49–54. DOI: 10.17580/nfm.2017.02.09.
 28. 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. *J. Rare Earths.* 2017. Vol. 35. P. 1022–1028. DOI: 10.1016/S1002-0721(17)61008-1.
 29. Akopyan T.K., Belov N.A., Naumova E.A., Letyagin N. New in-situ Al matrix composites based on Al–Ni–La eutectic. *Mater. Lett.* 2019. Vol. 245. P. 110–113. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.02.112.
 30. Michi R.A., Sisco K., Bahl S., Yang Y., Poplawsky J.D., Allard L.F., Dehoff R.R., Plotkowski A., Shyam A. A creep-resistant additively manufactured Al–Ce–Ni–Mn alloy. *Acta Mater.* 2022. Vol. 227. P. 117699. DOI: 10.1016/j.actamat.2022.117699.
 31. Тарасова Т.В., Гвоздева Г.О., Тихонова Е.П. Перспективы использования лазерного излучения для поверхностной обработки цветных сплавов. *Вестник МГТУ Станкин.* 2012. No. 2. С. 140–143.
Tarasova T.V., Gvozdeva G.O., Tihonova E.P. Aspects of use of laser emission for a surface treatment of non-ferrous alloys. *Vestnik MGTU Stankin.* 2012. No. 2. P. 140–143 (In Russ.).