

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 669-1

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.04.010

ИЗМЕНЕНИЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА Al-10Si-Mg, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Владимир Александрович Глушенков¹, Вячеслав Петрович Алексеев²,
Александр Исаакович Хаймович³, Екатерина Александровна Носова⁴,
Василий Андреевич Разживин⁵, Ринат Юнусович Юсупов⁶

Самарский университет, Московское шоссе, 34, г. Самара, 443086

¹vgl@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2879-8996>

²alekseev.vp@ssau.ru <https://orcid.org/0009-0009-0738-6720>

³khaymovich.ai@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9935-5703>

⁴nosova.ea@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5490-3235>

⁵razzhivin.va@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9735-5307>

⁶v vz@ssau.ru.

Аннотация. Актуальность исследования связана с обеспечением механических свойств образцов из алюминиевых сплавов, полученных селективным лазерным сплавлением. Получены пластины толщиной около 1 мм из порошкового алюминиевого сплава Al-10Si-Mg (RS300), проведена магнитно-импульсная обработка с силой тока 11...21 кА. Экспериментально подтверждено предположение, что под воздействием импульсного магнитного поля в образцах наводятся вихревые токи в несколько десятков килоампер, вызывающие неравномерное выделение тепла по материалу образца из-за большего уровня электросопротивления по границе зерен, которое приводит к мгновенному локальному выделению количества тепла, способного привести к микрооплавлению материала по границам частиц металлпорошковой композиции. Это, вероятно, может привести к изменению металлических связей между частицами, что в целом должно привести к повышению механических свойств изделия. Проведены испытания на одноосное растяжение и измерение микротвёрдости, выполнены металлографические исследования, которые показали изменение структуры по границам зерен и повышение механических свойств материала на 20-30%. Определены направления дальнейших исследований для объяснения изменения механических свойств после воздействия на алюминиевый сплав импульсным магнитным полем.

Ключевые слова: аддитивное производство, селективное лазерное выращивание, алюминиевый сплав, магнитно-импульсная обработка, микротвёрдость, механические свойства.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSSS-2024-0018)

Для цитирования: Глушенков В.А., Алексеев В.П., Хаймович А.И., Носова Е.А., Разживин В.А., Юсупов Р.Ю. Изменение под воздействием импульсного магнитного поля механических свойств образцов из сплава Al-10Si-Mg, полученных с помощью селективного лазерного сплавления // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 4. С. 477-486. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.04.010.

Original article

CHANGES IN THE MECHANICAL PROPERTIES OF AL-10SI-MG ALLOY SAMPLES UNDER THE INFLUENCE OF A PULSED MAGNETIC FIELD OBTAINED USING SELECTIVE LASER SINTERING

Vladimir A. Glouschenkov¹, Vyacheslav P. Alexeyev², Alexander I. Khaimovich³,
Ekaterina A. Nosova⁴, Vasilii A. Razzhivin⁵, Rinat Y. Yusupov⁶

Samara University, 34, Moskovskoye shosse, Samara

¹vgl@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2879-8996>

²alekseev.vp@ssau.ru <https://orcid.org/0009-0009-0738-6720>

³khaymovich.ai@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9935-5703>

⁴nosova.ea@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5490-3235>

⁵razzhivin.va@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9735-5307>

⁶vvz@ssau.ru.

Abstract. The relevance of the study is related to ensuring the mechanical properties of aluminum alloy samples obtained by selective laser fusion. Plates with a thickness of about 1 mm were obtained from Al-10Si-Mg (RS300) powder aluminum alloy, and magnetic pulse treatment with a current strength of 11...21 kA was performed. The assumption has been experimentally confirmed that whirl currents of several tens of kiloamperes are induced in samples under the influence of impulse magnet field, causing uneven heat generation across the sample material due to a higher level of electrical resistance along the grain boundary. That leads to an instantaneous local release of heat, which can lead to micro-melting of the material along the boundaries of metal powder composition particles. This can probably lead to a change in the metal bonds between the particles, which in general should lead to an increase in the mechanical properties of the product. Uniaxial tensile test, microhardness measurements and metallographic studies were performed, which showed a change in the grain boundary structure and an increase in the mechanical properties of the material by 20-30%. The directions of further research have been determined to explain the changes in mechanical properties after exposure to an aluminum alloy by a pulsed magnetic field.

Keywords: additive manufacturing, selective laser sintering, aluminum alloy, magnetic pulse processing, microhardness, mechanical properties.

Acknowledgements: The work was carried out within the support of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. FSSS-2024-0018)

For citation: Glouschenkov V.A., Alexeyev V.P., Khaimovich A.I., Nosova E.A., Razzhivin V.A. & Yusupov R.Y. (2025). Changes in the mechanical properties of Al-10Si-Mg alloy samples under the influence of a pulsed magnetic field obtained using additive technology. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(4), 477-486. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.04.010.

Введение

Постановка вопроса. В последние годы все большее распространение в машиностроении приобретают аддитивные технологии [1,2]. Это метод создания трехмерных объектов путем послойного добавления материала. Такие трехмерные или 3Д объекты создаются с помощью 3Д принтеров. В металлообработке для принтеров используются металлопорошковые композиции (МПК). При печати порошком реализуется лазерное сплавление частиц порошка.

В результате послойного сплавления частиц порошка печатается готовое изделие. С помощью аддитивной технологии изготавливаются детали различного назначения

Для реализации аддитивных технологий создано специализированное оборудование производства России, Германии, Китая и других стран [1], в котором используются МПК из разных материалов (сталь, титан, алюминий...), полученных методом газовой атомизации или методом центробежного распыления [3,4]. Размер частиц 10-60 мкм.

Аддитивные технологии обеспечивают получение деталей со сложной геометрией и значительно сокращают время производственного цикла [5,6]. Однако, в результате многочисленных неравномерных температурных нагрузок в изделиях возникают остаточные напряжения, вызывающие изменение геометрии готовых изделий и даже появления микротрещин. Кроме

того, одним из наиболее характерных типов внутренних дефектов аддитивного производства является пористость — распределенные по объему микропоры размером менее 40 мкм [7,8]. Эти явления снижают механические свойства материала изделий, получаемых с помощью аддитивных технологий. Для решения этой задачи используются различные подходы: создание припусков, обеспечивающих достижение требуемой геометрии, проведение термообработки, пластическая деформация, поверхностная высокоэнергетическая обработка [9,10]. Однако приоритетного решения этого вопроса на сегодняшний день не существует.

Задача разработки методов повышения механических свойств материала таких изделий является актуальной.

Предлагаемое техническое решение. Для повышения механических свойств материала изделий, полученных с помощью аддитивной технологии, предложен способ бесконтактного воздействия на готовое изделие импульсным магнитным полем (ИМП) [11,12]. Под действием ИМП в материале детали наводятся вихревые токи в десятки-сотни килоампер, длительность протекания которых составляет $(50 \div 100) \cdot 10^{-6}$ сек. Протекающие токи являются внутренним источником выделения тепла Q :

$$Q = I^2 R \tau, \text{ где}$$

I — импульсный ток,

R — электрическое сопротивление току,

τ — время протекания тока.

При этом выделение тепла по материалу образца неравномерно. Так, из-за большего значения электросопротивления R по границе зерен, мгновенно выделившееся количества тепла в этом месте, способно привести к микрооплавлению материала по границам частиц МПК. Поэтому, предполагается, что общий и локальный нагрев может привести к изменению металлических связей между частицами, что в целом должно привести к повышению механических свойств изделия.

Для проверки высказанного предположения выполнен объем механических и металлографических экспериментальных исследований и их результаты представлены в данной статье.

Методика и материалы

Для экспериментальных исследований изготавливались (печатались) пластины размером 75x75x0,8 мм с использованием порошковой

композиции из алюминиевого сплава RS300 (AlSi10Mg) с размером частиц порошка 15-53 мкм. 3Д печать пластин осуществлялась на установке M450 компании АО Лазерные системы (Россия) мощностью 500 Вт [11]. Для сплавления порошка в установке используется иттербиевый волоконный лазер с максимальной мощностью 500 Вт, работающий в непрерывном режиме. Для предотвращения окисления и возгорания части порошка во время процесса формирования монослоев рабочая камера заполнялась инертным газом — аргоном; при этом содержание кислорода, согласно данным поставщика, не превышало 0,2%.

Для обеспечения геометрической точности и с учетом особенностей процесса селективного лазерного сплавления, пластины выращивались на подложке — платформе построения.

Для подготовки модели пластин и стратегии их выращивания использовался программный продукт “PREPARE MODEL.LS.” Расположение пластин на платформе показано на рис. 1. Основные параметры технологии выращивания пластин: - скорость сканирования 930 мм/с, шаг сканирования 0,19 мм и толщина слоя 0,05 мм, мощность лазера 350 Вт.

Отделение пластин от платформы построения осуществлялось с использованием электроэрозионной обработки на установке ДК77 [13]. Пластины, изготовленные методом селективного лазерного сплавления, представлены на рис.2.

Полученные таким образом пластины подверглись бесконтактному воздействию ИМП. Схема обработки пластин ИМП приведена на рис.3.

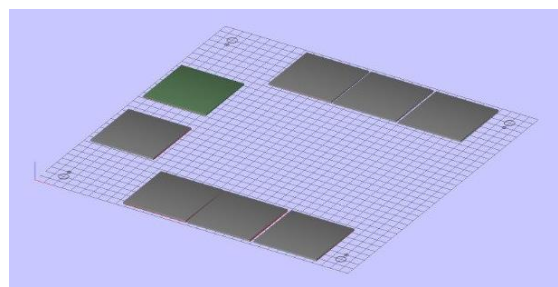


Рис.1 Расположение пластин на платформе построения в ПО Machine Control Software (SLM-MCS)

Fig.1. The location of the plates on the construction platform in Machine Control Software (SLM-MCS)



Рис.2. Внешний вид выращенных пластин

Fig.2. View of the sintered plates

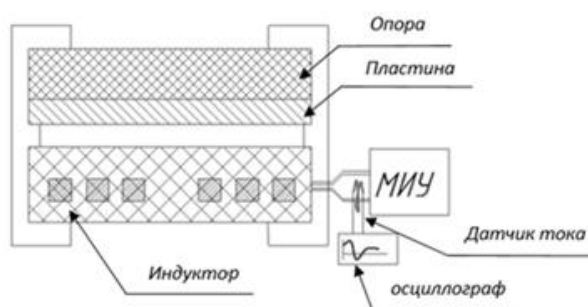


Рис.3. Схема обработки пластин ИМП

Fig.3. Scheme of plates' impulse magnet treatment

Многовитковый индуктор соединен с магнитно-импульсной установкой МИУ-15 [14,15] с максимальной запасаемой энергией 15 кДж.

На выводе индуктора закреплен датчик тока (пояс Роговского), с помощью которого измерялся ток I в разрядной цепи (установка-индуктор-пластина). Варьируя энергией, запасаемой в МИУ $W = cu^2/2$, получаем наведенный ток в пластине с разными амплитудными значениями (рис. 4). Кроме того, полученные осциллограммы разрядного тока позволяют определить период колебательного процесса T , и через него его частотные характеристики $f = 1/T$.

Круговая частота разрядного тока ω – дает возможность оценить значение скин-слоя $\Delta = \sqrt{2/\omega\mu}$ [16] – глубины, на которой наведенный ток в пластине ослабевает в “е” раз (γ – электропроводность порошкового алюминиевого материала, μ – его магнитная проницаемость). Оценочное значение величины Δ для используемого материала пластин и параметров разрядной цепи превышает 2,5 мм, что дает возможность считать, что ток по толщине пластины протекает равномерно.

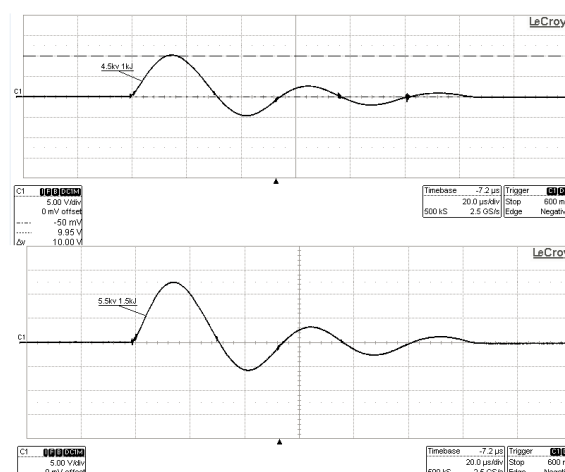


Рис.4. Примеры осциллограмм разрядного тока в индукторе при разряде на него конденсаторной батареи МИУ при энергии разряда 1 и 1,5 кДж

Fig.4. Examples of discharge current waveforms in an inductor when a MIU capacitor bank is discharged on it at discharge energies of 1 and 1.5 kJ

Для определения характера распределения напряженности ИМП в зазоре между индуктором и пластиной (по координатам X,Y) был собран измерительный стенд, где запитка индуктора током осуществлялась генератором синусоидальных сигналов ГЗ-109 в диапазоне частот 10...40 кГц в режиме неискаженной формы переменного тока, а значения относительной напряженности H измерялись с помощью датчика Холла.

В таблице 1 приведены амплитудные значения наведенных в пластинах токов при трех значениях энергиях разряда батареи конденсаторов МИУ.

В результате получена топография магнитного поля в плоскости индуктора и определены зоны с равномерным распределением H , т.е. области с идентичным воздействием ИМП на пластины. Из этих областей, после обработки пластин ИМП, вырезались образцы 5x50мм для последующих испытаний на растяжение (определение механических свойств), испытаний на твердость и для металлографического анализа.

Таблица 1 Параметры магнитно-импульсного воздействия на пластины

Table 1. Parameters of magnetic pulse action on plates

№	U, kV	W, кДж	I, кА	f, кГц
2	3	0.45	11.6	17.5
3	4.5	1.0	17.3	
4	5.5	1.53	21.7	

Испытание на растяжение осуществлялось на испытательной машине Tinius Olsen H5KT, с программным обеспечением Horizon (Германия), твердость – на автоматическом микротвердомере Matsuzawa MMT-X (Япония), с индентором в виде алмазной пирамидки, увеличение окуляра 40х, нагрузка 500 грамм силы и выдержка в течение 10 секунд, структура изучалась на оптическом микроскопе МЕТАМ ЛВ-41 с увеличением х500.

Таким образом, для образцов, вырезанных из пластин, достигалась идентичность параметров их обработки ИМП. Вырезка образцов с использованием технологии электроэрозионной резки на установке ДК77 не оказывает на них дополнительных термических и механических воздействий. Из каждой пластины вырезались и испытывались 8 образцов (рис.5).

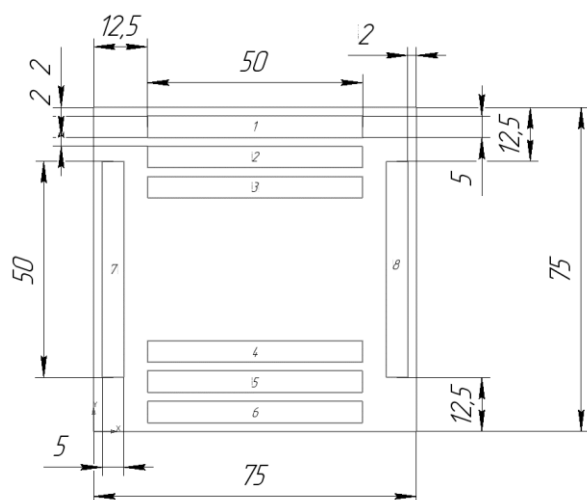


Рис.5. Схема вырезки образцов для экспериментальных исследований

Fig.5. Scheme of sample preparation for experimental

Результаты

Кривые испытания образцов на растяжение представлены на рис. 6. В таблице 2 представлены значения констант механических свойств и микротвёрдости материала образцов, подвергнутых воздействию ИМП.

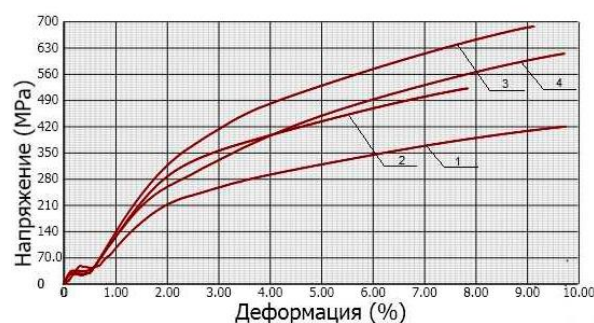


Рис. 6. Диаграммы растяжения образцов, подверженных воздействию ИМП: 1 – без применения ИМО, 2 – обработка импульсным магнитным полем силой тока 11 кА, 3 – обработка ИМП силой тока 17 кА, 4 – обработка ИМП силой тока 21 кА.

Fig.6. Strain diagrams of samples: 1- without treatment, 2 – IMP-treatment with current 11 kA, 3 IMP-treatment with current 17 kA, 4- IMP-treatment with current 21 kA.

Таблица 2 Изменение механических свойств материала образцов после воздействия на них ИМП

Table 2. mechanical properties of the sample material after exposure to IMT

Сила тока, кА	Предел прочности σ_B , Н/мм ²	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	Относительное удлинение δ , %	НВ, МПа
исх.	421±18	236±9	9,8±0,7	125±5
11	522±23	327±11	7,9±0,5	134±7
17	688±27	383±12	9,2±0,6	150±6
21	615±22	287±9	9,8±0,6	160±7

Кроме того, дополнительно измерена микротвердость зерна и межзеренной границы: на межзеренной границе значения микротвёрдости оказались вдвое выше твердости серединной части зерна.

Примеры изменения структуры материала образцов после воздействия ИМП приведены на рис.7.

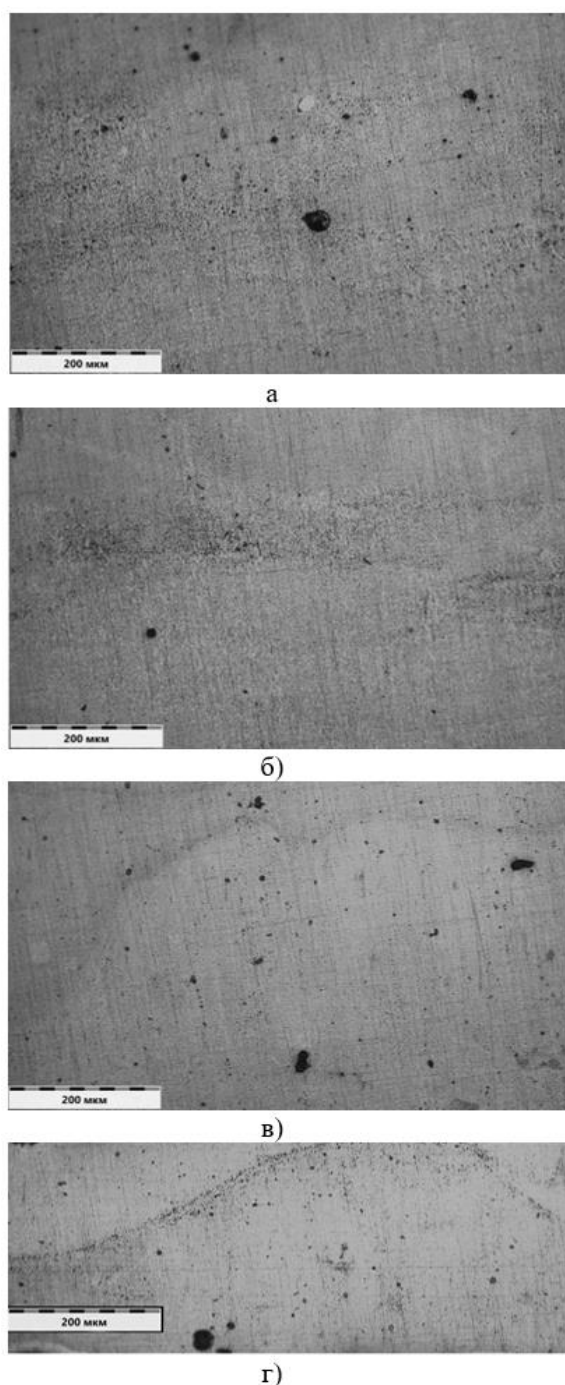


Рис. 7. Структура материала после воздействия на образцы ИМП: а - исходная структура, б, в, г - после воздействия импульсного тока силой 11 кА (б), 17,3 кА (в), 21 кА (г), увеличение 200

Fig.7. – The structure of the after exposure to IMP samples: a - the initial structure, b, c, d - after exposure to a pulse current of 11 kA (b), 17.3 kA (c), 21 kA (d)

Обсуждение.

В соответствии с нормативным документом на сплав RS300 (ТУ 24.42.00-002-

44669951-2019), который оговаривает механические свойства сплава в двух состояниях, - выращенном и отожжённом, и в зависимости от направления выращивания и приложения нагрузки, характеристики выращенных образцов находятся в диапазоне: $\sigma_b=450...470$ МПа, $\sigma_{0,2}=230...260$ МПа, $\delta=5,5...6\%$. Сопоставление полученных значений механических свойств с нормативными показывает, что прочностные характеристики оказались ниже заявленных. Однако в исследованиях [17,18] достигнут похожий уровень свойств в интервале $\sigma_b=330...340$ МПа, $\sigma_{0,2}=230...270$ МПа, $\delta=1,4...2,7\%$, т.е. предел прочности и относительное удлинение в выращенных образцах из сплава Al-10Si-Mg остаются ниже, чем заявленные в нормативных документах. Проведение термообработки, как отжига, так и закалки со старением не позволяют повысить механические свойства до требуемого уровня. Предложенное магнитно-импульсное воздействие позволяет выйти и даже превысить заявленный уровень как прочностных, так и пластических свойств.

Аналогично показателям прочности, средние значения микротвердости возрастают примерно в том же диапазоне (на 25-30%). В повышении твердости больший вклад вносят значения твердости в межзеренном слое (между частицами), что подтверждается металлографическим анализом. Объяснением изменению механических свойств сплава могут служить структурные особенности, такие как остаточные напряжения, пористость, геометрические параметры слоёв (треков). В исследовании [19] при изучении влияния параметров процесса селективного лазерного сплавления на структуру алюминиевого сплава AlSi10Mg показано, что значительное снижение пористости образцов наблюдается при увеличении плотности энергии до 35 Дж/мм³, более высокие значения плотности энергии не приводят к существенному снижению пористости, однако замечено, что увеличение плотности энергии до 92 Дж/мм³ и снижение скорости сканирования от 2000 до 1000 мм/с приводит к снижению твердости от 80 до 67 HRb. С ростом межтрекового расстояния от 0,6 до 0,2 мм увеличивается количество пор от 0,25 до 0,7%, причём эта тенденция становится более заметной с увеличением скорости сканирования свыше 1400 мм/с.

Косвенным подтверждением высокого уровня остаточных напряжений в образцах по-

сле селективного лазерного сплавления может являться ускоренная межкристаллитная коррозия сплава AlSi10Mg, выявленная в исследовании [20]. Проведение последующей термообработки позволяет частично улучшить состояние вопроса, однако не решает его полностью.

Ранее проведённые исследования [11, 12] показывают возможность повышения механических свойств сплава AlSi10Mg за счёт изменения остаточных напряжений, которые будут изучены в дальнейшем.

Выводы

1. Установлено повышение механических свойств под воздействием ИМП силой тока 11, 17 и 21 кА в образцах из сплава Al10SiMg (RS300), полученных с помощью аддитивной технологии. Воздействие ИМП приводит к возрастанию механических свойств σ_b , $\sigma_{0,2}$, HV на 25-30% без изменения пластичности δ и достижению механических свойств, заявленных в регламентирующих документах. Увеличение свойств происходит при повышении силы тока до 17,3 кА, при повышении силы тока до 21 кА наблюдается снижение механических свойств.

2. Выявлены структурные изменения в строении порошковых материалов под воздействием ИМП: уменьшение пористости и увеличение длины главной оси столбчатых кристаллов, которые могут являться объяснением изменения механических свойств.

3. Микротвёрдость возрастает от 125 до 160HV после воздействия импульсным магнитным полем силой тока 11...21 кА, увеличение силы тока приводит к повышению значений микротвёрдости. Замечено, что на границе слоёв (оплавленных частиц) микротвёрдость примерно на 70...80% выше, чем в теле частицы.

Список литературы

1. Григнирянц А.Г. и др. Лазерные аддитивные технологии в машиностроении: учебное пособие / под ред. А.Г. Григорьянца. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — 278 с.

2. Tebianian M., Aghaie S., Razavi Jafari N. S., Elmi Hosseini S. R., Pereira A. B., Fernandes F.A.O., Farbakhti M., Chen C., Huo Y. A review of the metal additive manufacturing processes //

Materials. 2023. Vol. 16, № 24, Art. 7514. DOI: 10.3390/ma16247514

3. Moghimian P., Poirié T., Habibnejad-Korayem M., Arreguin Zavala J., Kroeger J., Marion F., Larouche F. Metal powders in additive manufacturing: A review on reusability and recyclability of common titanium, nickel and aluminum alloys // Additive Manufacturing. 2021. Vol. 43, art. 102017. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102017

4. Алексеев В.В., Кирюшкин Г.А., Жуков Н.С., Шестерня В.И., Анашкин Д. А., Толстопятков М. И. Обзор порошковых материалов и их производство для 3-D печати // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2022. № 161–162.

5. Frazier W.E. Metal additive manufacturing: a review // J. of Materials Engineering and Performance. 2014. Vol. 23, № 6, с. 1917–1928. DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z

6. Alami A.H., et al. Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: recent trends and role in achieving sustainable development goals // Ain Shams Engineering Journal. 2023. Vol. 14, № 11, art. 102516. DOI: 10.1016/j.asej.2023.102516

7. Алешин Н.П., Григорьев М.В., Щипаков Н.А., Неруш С.В. Исследование ультразвукового метода оценки пористости изделий аддитивного производства // Цветные металлы. 2019. № 5. DOI: 10.17580/tsm.2019.05.05

8. Oliveira J.P., LaLonde A. D., Ma J. Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing // Materials & Design. 2020. Vol. 193, Art. 108762. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108762

9. Моркина А.Ю., Таров Д.В., Лутфуллин Р.Я., Татаринов П.С., Бебихов Ю.В., Семенов А.С., Корзникова Е.А., Дмитриев С.В. Обработка импульсным током пластин титанового сплава ВТ6 после гибки для ослабления пружинения // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 3. С. 324-334. doi:10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.008

10. Сугоняко И.С., Моркина А.Ю., Таров Д.В., Татаринов П.С., Бебихов Ю.В., Семенов А.С., Корзникова Е.А., Дмитриев С.В. Обзор

последних работ по электроимпульсной обработке сталей с целью улучшения их свойств // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 3. С. 342–358. doi:10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.010

11. Глушников В.А., Хаймович А.И., Саргаева Т.С., Ерисов Я. А., Юсупов Р.Ю., Кауров И.В., Балякин А.В. Влияние импульсного магнитного поля на структуру и свойства пластин из сплава AlSi10Mg, полученных селективным лазерным сплавлением // Деформация и разрушение материалов. 2023. № 5. С. 21–24.

12. Глушников В.А., Хаймович А.И., Саргаева Т.С., Ерисов Я. А., Юсупов Р.Ю., Кауров И.В., Балякин А.В. Способ гибридной аддитивной технологии — лазерное спекание с одновременным воздействием импульсного магнитного поля / патент РФ № 2839598 С2. Заявка № 2023123025 от 04.09.2023. Зарегистрировано в РФ 06.05.2025. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82331107> (дата обращения: 2024-04-27).

13. Каталог оборудования // Сайт АО Лазерные системы -2025/ — URL: https://www.lsystems.ru/bitrix/templates/laser/statistics/3D_printers.pdf (дата обращения 06.10.2025)

14. Электроэрозионные станки: производство, поставка, модернизация ремонт // Сайт группы компаний MEATEC. -2025/ — URL: 06.10.2025)

15. Глушников В.А., Карпучин В.Ф. Технология магнитно-импульсной обработки материалов. Самара: Издательский дом «Федоров», 2014. 208 с.

16. Прокофьев А.Б. и др. Магнитно-импульсная обработка материалов (МИОМ): монография. Самара: АНО «Издательство СНЦ», 2019. 140 с.

17. Aboulkhay N.T., Maskery I., Tuck C. The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment // Materials Science & Engineering: A. 2016. Vol. 667. P. 139–146. DOI: 10.1016/j.msea.2016.04.092.,

18. Noriko Read, Wei Wang, Khamis Essa. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development // Materials and Design. 2015. Vol. 65. P. 417–424. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.09.044

19. Дынин Н.В., Заводов А.В., Оглодков М.С., Хасиков Д.В. Влияние параметров процесса селективного лазерного сплавления на структуру алюминиевого сплава системы Al-Si-Mg // Труды ВИАМ. 2017. № 10(58). — С. 1. — DOI 10.18577/2307-6046-2017-0-10-1-1.

20. Фомина М.А., Дынин Н.В., Шуртаков С.В., Морозова С.Е. Коррозионное поведение алюминиевого сплава системы Al-Si-Mg, синтезированного методом селективного лазерного сплавления // Труды ВИАМ. 2018. № 4(64). С. 91-100. DOI 10.18577/2307-6046-2018-0-4-91-100.

Информация об авторах

В.А.Глушников — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры обработки металлов давлением Самарского университета

В.П.Алексеев - кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии производства двигателей Самарского университета

А.И.Хаймович - доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии производства двигателей Самарского университета

Е.А.Носова — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского университета.

В.А.Разживин — ассистент кафедры обработки металлов давлением Самарского университета

Р.Ю.Юсупов - научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории прогрессивных технологических процессов пластического деформирования Самарского университета

References

1. Grigniriyants A. G. et. al. Laser additive technologies in mechanical engineering: a textbook / edited by A. G. Grigoryants. Moscow : Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, 2018. 278 p.

2. Tebianian M., Aghaie S., Razavi Jafari N. S., Elmi Hosseini S. R., Pereira A. B., Fernandes F. A. O., Farbakhti M., Chen C., Huo Y. A review of

- the metal additive manufacturing processes // *Materials*. 2023. Vol. 16, No 24, P. 7514. DOI: 10.3390/ma16247514
3. Moghimian P., Poirié T., Habibnejad-Korayem M., Arreguin Zavala J., Kroeger J., Marion F., Larouche F. Metal powders in additive manufacturing: A review on reusability and recyclability of common titanium, nickel and aluminum alloys // *Additive Manufacturing*. 2021. Vol. 43. P. 102017. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102017
4. Alekseyenko V.V., Kiryushkin G.A., Zhukov N.S., Shesternya V.I., Anashkin D.A., Tolstopyatov M.I. Review of powder materials and their production for 3-D printing // *Actual problems of aviation and cosmonautics*. 2022. № 161–162.
5. Frazier W. E. Metal additive manufacturing: a review // *J. of Materials Engineering and Performance*. 2014. Vol. 23, No. 6, pp. 1917–1928. DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z
6. Alami A. H., et al. Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: recent trends and role in achieving sustainable development goals // *Ain Shams Engineering Journal*. 2023. Vol. 14, № 11, art. 102516. DOI: 10.1016/j.asej.2023.102516
7. Aleshin N.P., Grigoriev M. ., Shchipakov N. ., Nerush S. . Investigation of the ultrasonic method for assessing the porosity of additive manufacturing products // *Non-ferrous metals*. 2019. № 5. DOI: 10.17580/tsm.2019.05.05
8. Oliveira J.P., LaLonde A.D., Ma J. Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing // *Materials & Design*. 2020. Vol. 193, Art. 108762. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108762
9. Morkina A.Yu., Tarov D.V., Lutfullin R.Ya., Tatarinov P.S., Bebikhov Yu.V., Semenov A.S., Korznikova E.A., Dmitriev S.V. Pulsed current treatment of VT6 titanium alloy plates after bending to weaken the spring // *Fundamental problems of modern materials science*. 2025. Vol. 22, No. 3. pp. 324–334. doi:10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.008
10. Sugonyako I.S., Morkina A.Yu., Tarov D.V., Tatarinov P.S., Bebikhov Yu.V., Semenov A.S., Korznikova E.A., Dmitriev S.V. Review of recent work on electric pulse processing of steels in order to improve their properties // *Fundamental problems of modern materials science*. 2025. Vol. 22, No. 3. pp. 342–358. doi:10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.010
11. Glushchenkov V.A., Khaimovich A.I., Sargaeva T.S., Yerisov Ya.A., Yusupov R.Yu., Kaurov I.V., Balyakin A.V. Influence of a pulsed magnetic field on the structure and properties of AlSi10Mg alloy plates obtained by selective laser fusion // *Deformation and destruction of materials*. 2023. No. 5. pp. 21–24.
12. Glushchenkov V.A., Khaimovich A.I., Sargaeva T.S., Yerisov Ya.A., Yusupov R.Yu., Kaurov I.V., Balyakin A.V. Method of hybrid additive technology — laser sintering with simultaneous exposure to a pulsed magnetic field / RF patent No. 2839598 C2. Application No. 2023123025 dated 09/04/2023. Registered in the Russian Federation on 05/06/2025. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82331107> (date of access: 2024-04-27).
13. Equipment catalog // Website of JSC Laser Systems –2025/ – URL: https://www.lsystems.ru/bitrix/templates/laser/statistics/3D_printers.pdf (date of issue 06.10.2025)
14. Electroerosion machines: production, supply, modernization and repair // Website of the MEATEC group of companies. –2025/ – URL: 06.10.2025)
15. Glushchenkov V.A., Karpukhin V.F. Technology of magnetic pulse processing of materials. Samara: Publishing house "Fedorov", 2014. 208 p.
16. Prokofiev A.B. et al. Magnetic pulse processing of materials (MIOM): monograph. Samara: ANO "SNC Publishing House", 2019. 140 p.
17. Aboulkhai N.T., Maskery I., Tuck C. The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment // *Materials Science & Engineering: A*. 2016. Vol. 667. P. 139–146. DOI: 10.1016/j.msea.2016.04.092.
18. Noriko Read, Wei Wang, Khamis Essa. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimization and mechanical properties development // *Materials and Design*. 2015. Vol. 65. P. 417–424. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.09.044
19. Dynin N.V., Zavodov A.V., Oglodkov M.S., Khasikov D.V. Influence of the parameters

of the selective laser melting process on the structure of the aluminum alloy of the AL-SI-MG system // Proceedings of VIAM. - 2017. - No. 10 (58). - С. 1. - DOI 10.18577/2307-6046-2017-0-10-1-1.

20. Fomina M.A., Dynin N.V., Shurtakov S.V., Morozova S.E. Corrosion behavior of an aluminum alloy of the Al-Si-Mg system synthesized by selective laser melting // Proceedings of VIAM. 2018. No. 4 (64). P. 91-100. - DOI 10.18577/2307-6046-2018-0-4-91-100.

Information about the authors

V.A.Glushchenkov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metalworking by Pressure of Samara University

V.P.Alekseyev - Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of En-

gine Manufacturing Technology of Samara University

A.I.Khaimovich - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Engine Manufacturing Technology at Samara University

E.A.Nosova – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science at Samara University.

V.A.Razzhivin – Assistant Professor at the Department of Metalworking by Pressure of Samara University

R.Yu.Yusupov - Researcher at the Scientific Research Laboratory of Advanced Technological Processes of Plastic Deformation of Samara University

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 15.10.2025; одобрена после рецензирования 24.11.2025; принята к публикации 01.12.2025.

The article was received by the editorial board on 15 Oct. 2025; approved after reviewing 24 Nov. 2025; accepted for publication 01 Dec. 2025.