

УДК 669

Влияние амплитуды наносекундных электромагнитных импульсов на структурообразование и свойства алюмоматричных композиционных сплавов Al–Mg₂Si

Ким Евгений Давидович^(*)

010848@togudv.ru

SPIN-код: 9318-9559

Борец Максим Игоревич

2019104946@togudv.ru

Ри Эрнст Хосенович

003232@togudv.ru

SPIN-код: 7783-3389

ТОГУ, Хабаровск, Россия

Аннотация. Статья посвящена изучению влияния вариаций амплитуды наносекундных электромагнитных импульсов (НЭМИ) на процессы структурообразования, ликвирования и механические свойства алюмоматричных композиционных сплавов Al–Mg₂Si. Современные требования к эксплуатационным характеристикам функциональных материалов стимулируют разработку методов направленного формирования внутренней структуры сплавов, что делает актуальной необходимость глубокого понимания взаимосвязи параметров технологического воздействия и физико-механических свойств композитов. Представленный аналитический обзор демонстрирует современные тенденции в создании литых композиционных материалов с контролируемой архитектурой внутренней структуры. Приведен детальный анализ специфики влияния НЭМИ на процессы кристаллизации, механизм формирования структурных дефектов и перераспределения химических элементов в объеме расплава. Экспериментальные исследования, выполненные в рамках данной работы, раскрывают ключевые аспекты динамики структурных преобразований в алюмоматричных композициях под воздействием электромагнитных импульсов различной интенсивности. Предложена оригинальная схема описания кинетики диффузионных процессов и перераспределения элементов при действии НЭМИ, объясняющая изменение микротвердости и макроскопических свойств материала. Результаты представленного исследования расширяют фундаментальную базу знаний в области материаловедения и создают предпосылки для развития энергоэффективных технологий модификации внутренних структур литых композитов, ориентированных на обеспечение уникальных эксплуатационных характеристик будущих поколений промышленных изделий.

Ключевые слова: алюмоматричные композиционные сплавы, электромагнитные импульсы наносекундного диапазона (НЭМИ), амплитуда электромагнитного импульса, структурообразование, микротвердость, ликвационные процессы, модификация структуры, материалы нового поколения, энергосберегающие технологии

The influence of the amplitude of nanosecond electromagnetic pulses on structure formation and properties of aluminum - matrix composite alloys Al–Mg₂Si

Kim Evgeny Davidovich^(*)

010848@togudv.ru
SPIN-code: 9318-9559

Borets Maxim Igorevich

2019104946@togudv.ru

Ri Ernst Khosenovich

003232@togudv.ru
SPIN-code: 7783-3389

Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation

Abstract. This article is devoted to studying the influence of variations in the amplitude of nanosecond electromagnetic pulses (NEMP) on the structure formation, liquation processes, and mechanical properties of aluminum-matrix composite alloys Al–Mg₂Si. Modern requirements for the operational characteristics of functional materials stimulate the development of methods for the directed formation of the internal structure of alloys, making it essential to gain a deep understanding of the relationship between the parameters of technological influence and the physical-mechanical properties of composites. The presented analytical review demonstrates current trends in the development of cast composite materials with controlled internal structure architecture. A detailed analysis is provided on the specific effects of NEMP on crystallization processes, the mechanism of structural defect formation, and the redistribution of chemical elements in the melt volume. Experimental studies conducted as part of this work reveal key aspects of the dynamics of structural transformations in aluminum-matrix composites under the influence of electromagnetic pulses of varying intensity. An original scheme is proposed to describe the kinetics of diffusion processes and element redistribution under NEMP exposure, explaining changes in microhardness and macroscopic material properties. The results of this study expand the fundamental knowledge base in materials science and create prerequisites for the development of energy-efficient technologies for modifying the internal structures of cast composites, aimed at ensuring the unique operational characteristics of future generations of industrial products.

Keywords: aluminum-matrix composite alloys, nanosecond electromagnetic pulses (NEMP), electromagnetic pulse amplitude, structure formation, microhardness, liquation processes, structure modification, next-generation materials, energy-saving technologies

Введение. Создание инновационных материалов с заранее прогнозируемыми и регулируемыми свойствами является ключевым направлением современной индустрии материаловедения [1–2]. Сегодня особое внимание привлекают алюмоматричные композиционные сплавы (АКС), характеризующиеся сочетанием легких весовых характеристик, повышенной прочности и стойкостью к износу [3–4]. Однако традиционные методы улучшения свойств АКС достигли своего предела, и дальнейший прогресс возможен лишь за счет углубленного понимания влияния внешних воздействий на процессы структурообразования и ликвирования.

Современные потребности индустриальной сферы диктуют важность разработки новых стратегий проектирования материалов, способных функционировать в сложных условиях эксплуатации. Согласно данным Международной ассоциации производителей композитов (ISMA), доля АКС в мировом рынке инженерных материалов достигла рекордных значений — около 75 %. Тем не менее, значительная часть потенциальных возможностей остается неиспользованной ввиду отсутствия четких рекомендаций по управлению параметрами обработки.

Одним из многообещающих подходов является применение наносекундных электромагнитных импульсов (НЭМИ), способных инициировать существенные изменения в расплавах, приводящие к формированию оптимальной внутренней структуры [5, 6]. Хотя значительное число исследований посвящено влиянию частоты и длительности НЭМИ, роль амплитуды сигнала остается недостаточно изученной.

Целью данной работы является изучение влияния амплитуды наносекундных электромагнитных импульсов на структурообразование и свойства алюмоматричных композиционных сплавов с различным содержанием Mg_2Si .

Исходя из цели работы были сформулированы следующие задачи исследования:

- проведение систематизированного обзора научной литературы по применению НЭМИ в формировании АКС;
- разработка экспериментальной схемы оценки влияния амплитуды НЭМИ на микроструктуру и свойства АКС;
- оценка количественной корреляции между амплитудой импульса и ключевыми физико-механическими показателями АКС;
- создание научно-обоснованного протокола обработки АКС для максимального раскрытия потенциала их технических характеристик.

Методы и материалы. Объектом исследования являлись алюмоматричные композиционные сплавы (АКС) системы $Al-Mg_2Si$ с двумя вариантами массовой доли Mg_2Si : 15 и 25 %. Все испытания выполнялись на серии образцов, сформированных методом литья и прошедших последующее облучение наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) с варьируемой амплитудой от 0 до 40 кВ.

Для получения алюмоматричных композитов использовали чистые компоненты: алюминий (> 99,99 %), магний (> 99,9 %), кремний (>99,0 %). Плавку проводили в графитовых тиглях в электрической печи сопротивления типа GRAFICARBO (Италия).

Предварительно печь была нагрета до температуры 900–910 °С. Загрузку алюминия осуществляли при температуре 750–760 °С. После расплавления алюминия в печь подавался чистый аргон до окончания разливки металла. Магний и кремний заворачивали в алюминиевую фольгу и вводили в жидкий алюминий при $T = 750-760$ °С. Все шихтовые материалы и инструменты предварительно подогревались в сухожаровом шкафу при $T = 150-155$ °С.

Источником электромагнитных волн служил генератор FID Technology (Германия) со следующими характеристиками: полярность импульсов положительная; изменяемая амплитуда импульсов — до 40 кВ; длительность импульсов — 0,5 нс; изменяемая частота следования генерируемых импульсов — до 1 кГц; задержка выходного импульса относительно фронта импульса запуска — 120 нс. Воздействие НЭМИ на алюминиевый расплав осуществляли путем погружения излучателей при $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$. Данные экспериментов получены при обработке расплава НЭМИ в графитовом тигле вместимостью 2 кг по меди.

Масса обрабатываемого расплава составляла 140—170 г. Излучатели представляли собой электроды в виде пластин из нержавеющей стали шириной 10 мм и высотой 140 мм. Размеры электродов подбирали таким образом, чтобы расстояние между ними при обработке было около 20 мм. После обработки расплав перемешивали графитовым стержнем и разливали при $T = 720\text{ }^{\circ}\text{C}$ в стальную изложницу.

Анализ элементного состава полученных слитков проводили с использованием рентгено-флуоресцентного спектрометра Спектроскан МАКС-GV. Металлографический анализ структуры — на оптическом микроскопе MICRO 200.

Для исследования морфологии и элементного состава структурных составляющих сплавов использовались методы растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного микрорентгеноспектрального анализа на аналитическом исследовательском комплексе на базе FE-SEM Hitachi SU-70 с приставками для элементного ЭДС анализа (Thermo Scientific Ultra Dry).

Определение микротвердости производилось методом Виккерса (HV) на микротвердомере Shimadzu HNMV-G21DT.

Результаты. Структура композитов Al-Mg₂Si в литом состоянии при различном времени выдерживания расплава в процессах его температурно-временной обработки приведена на рис. 1. Характерная микроструктура композитов Al-Mg₂Si представлена литой матрицей (алюминиевый α -твердый раствор) и частицами первичной фазы Mg₂Si.

Распределение элементов в структурных составляющих представлено на рис. 2. Как видно, с увеличением амплитуды генератора НЭМИ с 10 до 40 кВ фазовый состав комплексно-легированного алюминид кремния с Fe и Mg изменяется по экстремальной зависимости с максимумом концентрации Al и минимумами содержания Mg, Si и Fe при облучении расплава НЭМИ с амплитудой 30 кВ. При этом стехиометрия комплексно-легированных алюминидов кремния практически не изменяется Al_x(Si, Fe, Mg), где:

- $x = 2,98$ при амплитуде 10 кВ;
- $x = 3,3$ при амплитуде 20 кВ;
- $x = 3,4$ при амплитуде 30 кВ;
- $x = 2,55$ при амплитуде 40 кВ.

Следовательно, Al_{2,55–3,4}(Si, Fe, Mg) $\approx$ Al₃(Si, Fe, Mg).

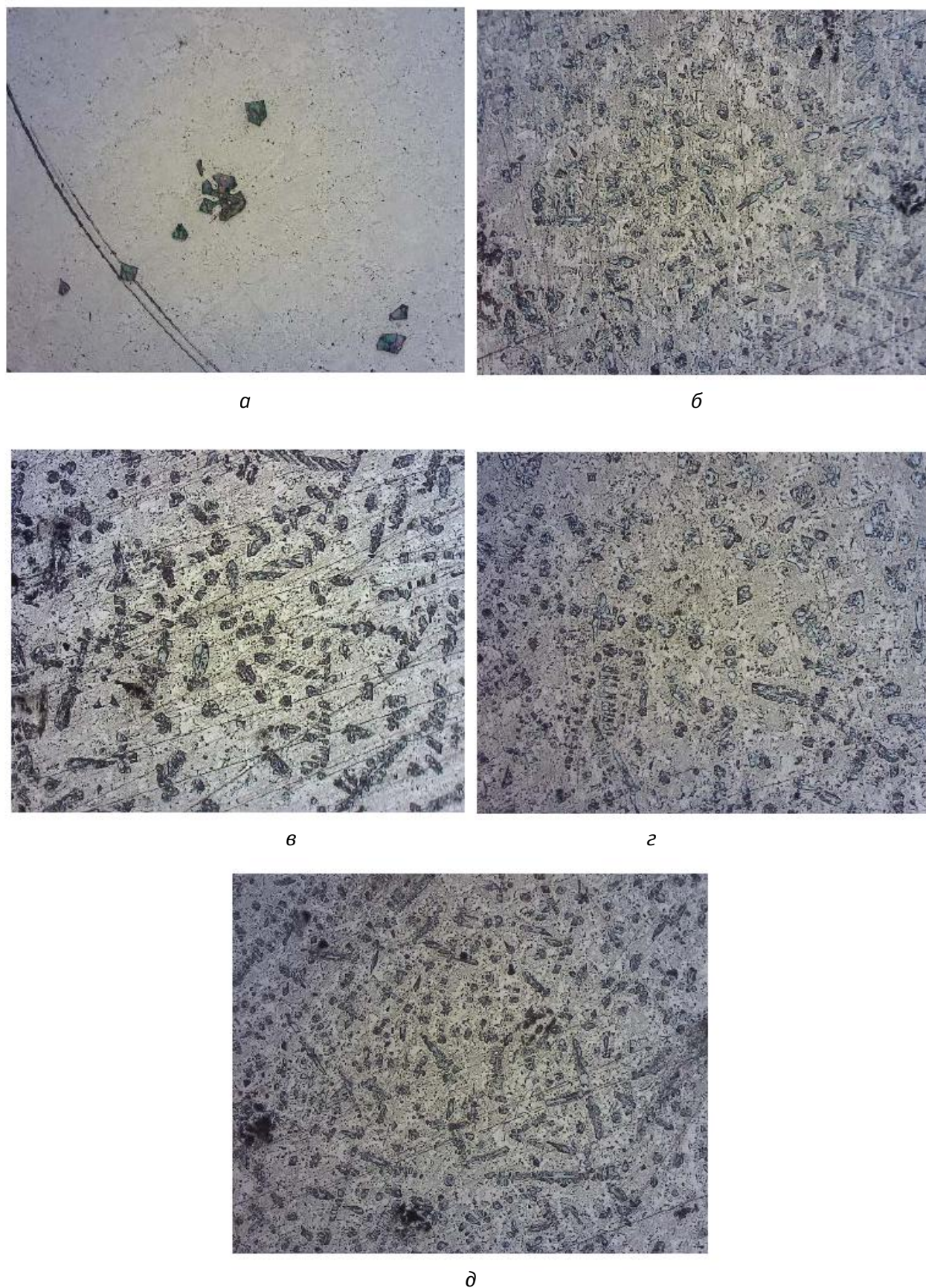


Рис. 1. Микроструктура сплавов $\text{Al}+\text{Mg}_2\text{Si}$ ($\text{Al}-\text{Mg}-\text{Si}$), облученных наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) с разной амплитудой генератора, X200:
а — 0 kV; б — 10 kV; в — 20 kV; г — 30 kV; д — 40 kV

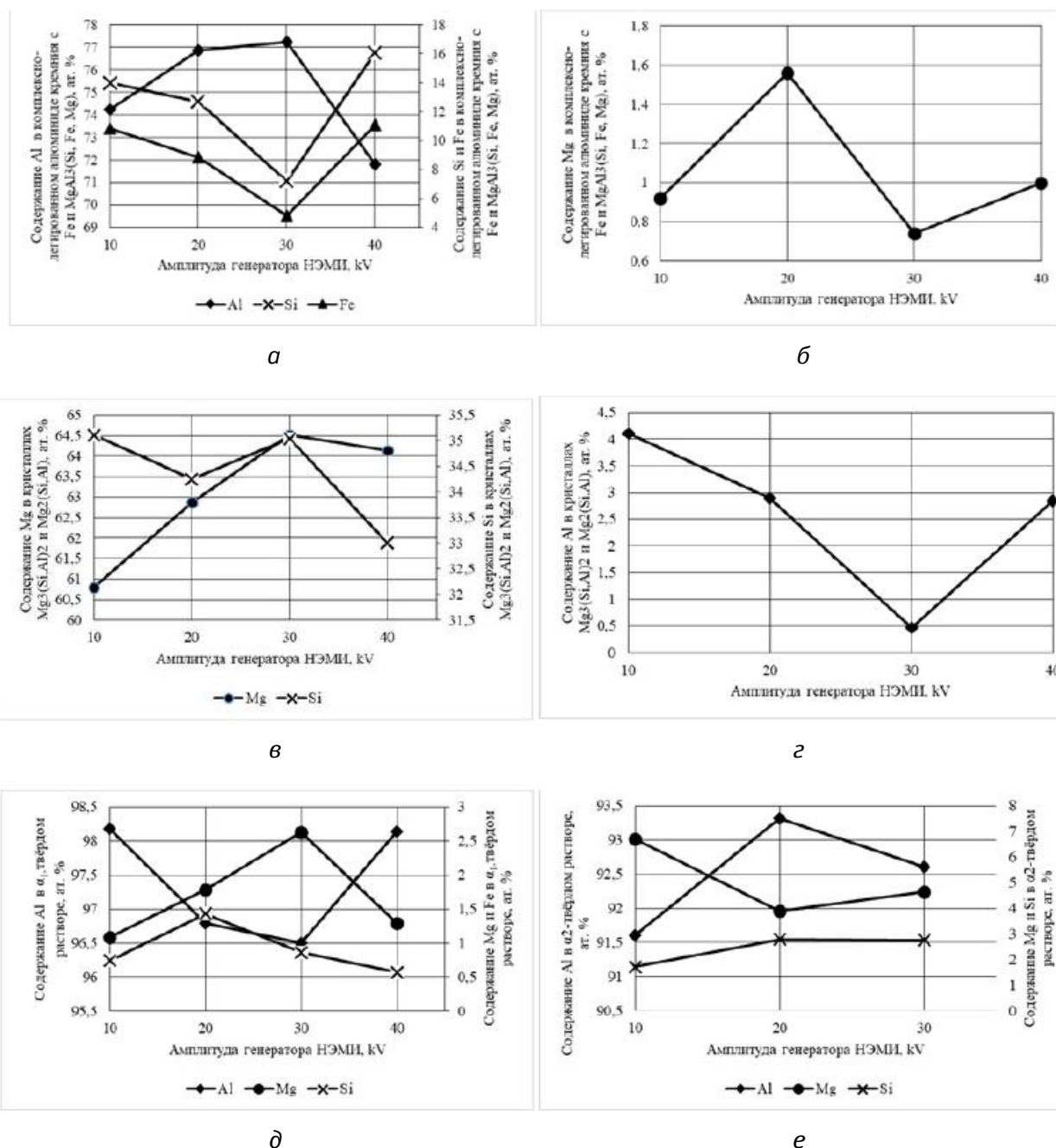


Рис. 2. Величина амплитуды генератора НЭМИ на характер распределения элементов в структурных составляющих сплавов Al + Mg–Si (25 мас. % Mg₂Si)

Фазовый состав комплексно-легированного соединения магния с Si и Al изменяется от амплитуды генератора НЭМИ по экстремальной зависимости с максимумами содержания Mg и Si и минимумом концентрации Al при обработке расплава НЭМИ с амплитудой, равной 30 kV. При этом стехиометрия комплексно-легированного соединения Mg_x с Si и Al Mg_x(Si, Al) изменяется:

$$\left. \begin{array}{l} x = 3,1 \text{ при амплитуде } 10 \text{ kV;} \\ x = 3,4 \text{ при амплитуде } 20 \text{ kV;} \end{array} \right\} \text{Mg}_3(\text{Si}, \text{Al})_2;$$

$$\left. \begin{array}{l} x = 1,82 \text{ при амплитуде } 30 \text{ kV;} \\ x = 1,79 \text{ при амплитуде } 40 \text{ kV.} \end{array} \right\} \text{Mg}_2(\text{Si}, \text{Al}).$$

Следовательно, происходит изменение стехиометрии от $\text{Mg}_3(\text{Si}, \text{Al})_2 \rightarrow \text{Mg}_2(\text{Si}, \text{Al})$.

Содержание элементов в α_1 -твердом растворе изменяется по экстремальной зависимости с максимумами концентрации Mg и Si и минимумом содержания Al при облучении расплава амплитудой 30 kV. Фазовый состав эвтектики ($\alpha_2 + \text{Al}_x(\text{Mg}, \text{Si})$) также изменяется.

Заключение. Данная работа была направлена на изучение влияния амплитуды наносекундных электромагнитных импульсов (НЭМИ) на структурообразование и свойства алюмоматричных композиционных сплавов (АКС) с различным содержанием Mg_2Si (15 и 25 %). Проанализировано современное состояние исследований влияния НЭМИ на структуру и свойства АКС. Выделены ключевые факторы, определяющие качественные характеристики композитов. Разработана и апробирована методика облучения расплава с изменением амплитуды импульсов (0, 10, 20, 30, 40 кВ). Показано, что наибольший эффект наблюдается при максимальных амплитудах. Амплитуда НЭМИ оказывает прямое влияние на распределение элементов в структуре АКС. При увеличении амплитуды улучшается дисперсия армирующих фаз, уменьшается средний размер зерен и повышается микротвердость. Максимальная амплитуда (40 кВ) показала наилучшее влияние на микроструктуру и механические свойства композитов, обеспечивая оптимальное соотношение между прочностью и пластичностью. Полученные результаты вносят важный вклад в теорию и практику создания высокопрочных АКС с заданными свойствами, расширяя возможности использования таких материалов в ответственном машиностроении и авиакосмической отрасли. Основным недостаток проведенных исследований связан с ограниченной областью тестирования. Необходимо дальнейшее изучение влияния длительности импульсов и повторяемости циклов облучения на физико-механические свойства АКС. Результаты данной работы подтверждают высокую эффективность метода НЭМИ для целенаправленного управления качеством алюмоматричных композиционных сплавов, создавая новые перспективы для развития современных материалов с заданными функциональными свойствами.

Список источников

- [1] Kumar V.M., Venkatesh C.V. A comprehensive review on material selection, processing, characterization and applications of aluminium metal matrix composites. *Materials Research Express*, 2019, vol. 6, no. 7, art. no. 072001.
- [2] Deev V. et al. Effect of La addition on solidification behavior and phase composition of cast Al-Mg-Si Alloy. *Metals*, 2020, vol. 10, no. 12, art. no. 1673.
- [3] Prusov E.S., Shabaldin I.V., Deev V.B. Quantitative characterization of the microstructure of in situ aluminum matrix composites. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021, vol. 2131, no. 4, art. no. 042040.

- [4] Jin Y. et al. Effects of Eu modification and heat treatment on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al–Mg₂Si composites. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, vol. 831, Art. no. 142227.
- [5] Deev V. B. et al. Grain refinement of casting aluminum alloys of the Al–Mg–Si system by processing the liquid phase using nanosecond electromagnetic pulses. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2021, vol. 62, no. 5, pp. 522–530.
- [6] Deev V. B. et al. Influence of Parameters of Melt Processing by Nanosecond Electromagnetic Pulses on the Structure Formation of Cast Aluminum Matrix Composites. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2022, vol. 63, no. 4, pp. 392–399.