



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-2-117-124>
УДК 669.2.017:620.18; 669.2.017:620.17

Поступила 19.04.2024
Received 19.04.2024

ЛАЗЕРНОЕ ОСАЖДЕНИЕ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И МАГНИЯ ДЛЯ РЕМОНТА И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ

Б. М. НЕМЕНЕНОК, О. Г. ДЕВОЙНО, П. Е. ЛУЩИК, И. В. РАФАЛЬСКИЙ, А. Д. РУЛЕНКОВ,
Белорусский национальный технический университет, Республиканское инновационное унитарное
предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник», г. Минск, Беларусь, ул. Я. Коласа, 24.
E-mail: nemenenok@bntu.by

Представлены результаты исследования процессов лазерного осаждения сплавов на основе алюминия и магния, особенностей структуры осажденных слоев с использованием данных электронной микроскопии и рентгенографической компьютерной томографии, измерений микротвердости после лазерного осаждения алюминиевых и магниевых сплавов. Выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния плоских деталей при лазерном осаждении алюминий-магниевого сплава с содержанием магния 0,6–0,95%, кремния – 0,7–1,0, титана – до 0,3, цинка – до 0,5, марганца – до 0,4%. Установлен характер распределения деформаций и напряжений при использовании различных технологических схем лазерного осаждения при поверхностной обработке алюминий-магниевых сплавов методами лазерного осаждения.

Ключевые слова. Лазерное осаждение, сплавы на основе алюминия, сплавы на основе магния, структура, свойства, моделирование, распределения деформаций и напряжений.

Для цитирования. Немененок, Б. М. Лазерное осаждение сплавов на основе алюминия и магния для ремонта и восстановления поверхности деталей / Б. М. Немененок, О. Г. Девоино, П. Е. Лущик, И. В. Рафальский, А. Д. Руленков // *Литье и металлургия*. 2024. № 2. С. 117–124. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-2-117-124>.

LASER DEPOSITION OF ALUMINUM AND MAGNESIUM-BASED ALLOYS FOR REPAIR AND SURFACE RESTORATION OF COMPONENTS

B. M. NEMENENOK, O. G. DEVOYNO, P. E. LUSHCHIK, I. V. RAFALSKI, A. D. RULENKOV,
Belarusian National Technical University, State Unitary Innovative Enterprise “Science and Technology
Park of BNTU “Polytechnic”, Minsk, Belarus, 24, Ya. Kolasa str. E-mail: nemenenok@bntu.by

The results of studying the processes of laser deposition of aluminum and magnesium-based alloys, the features of the structure of deposited layers using electron microscopy and X-ray computed tomography data, measurements of microhardness after laser deposition of aluminum and magnesium alloys are presented. Modeling of the stress-strain state of flat components during laser deposition of an aluminum-magnesium alloy containing 0.6–0.95% magnesium, 0.7–1.0 silicon, up to 0.3 titanium, up to 0.5 zinc, and up to 0.4% manganese was performed. The nature of the distribution of deformations and stresses during the use of various technological schemes of laser deposition during surface treatment of aluminum-magnesium alloys by laser deposition methods is established.

Keywords. Laser deposition, aluminum-based alloys, magnesium-based alloys, structure, properties, modeling, deformation and stress distribution.

For citation. Nemenenok B. M., Devoyno O. G., Lushchik P. E., Rafalski I. V., Rulenkov A. D. Laser deposition of aluminum and magnesium-based alloys for repair and surface restoration of components. *Foundry production and metallurgy*, 2024, no. 2, pp. 117–124. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-2-117-124>.

Введение

Сплавы на основе алюминия и магния нашли широкое применение в строительстве, машино- и судостроении, авиационной, автомобильной, химической, нефтяной и других отраслях промышленности для изготовления различных деталей и конструкций ответственного назначения. Благодаря низкой плотности, высоким механическим свойствам и коррозионной стойкости использование деталей из этих сплавов обеспечивает эффективное снижение массы узлов и компонентов машин, оборудования и инструмента. Однако в процессе работы, особенно в тяжелых условиях эксплуатации, вероятность повреждения локальных участков таких деталей или узлов вследствие износа, коррозии или появления

усталостных трещин, как правило, выше, чем у стальных изделий. Оперативный ремонт и восстановление поврежденных дорогостоящих деталей позволяет не только снизить эксплуатационные расходы, но и обеспечить безопасность работы используемого оборудования. В связи с этим разработка и совершенствование эффективных технологий ремонта и восстановления деталей из сплавов на основе алюминия и магния является актуальной задачей.

В настоящее время активно проводятся исследования по разработке и совершенствованию методов ремонта и восстановления деталей из алюминиевых и магниевых сплавов с использованием методов лазерной обработки (лазерного осаждения, наплавки, легирования, сварки и др.) [1–5]. Методы лазерной обработки сплавов на основе алюминия и магния имеют ряд очевидных преимуществ: возможность высокоэнергетической локальной обработки поверхности деталей, высокая производительность процесса, наличие серийно выпускаемого оборудования и относительная простота технологии лазерной обработки, что обеспечивает использование разнообразных технологических режимов и автоматизацию процессов лазерной обработки.

Алюминиевые и магниевые сплавы имеют относительно низкие температуры плавления ($660\text{ }^{\circ}\text{C}$ для алюминия и $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ для магния), однако из-за высокой теплопроводности и отражательной способности поверхности сплавов на основе алюминия и магния в процессах лазерного осаждения необходимо задавать высокую мощность и скорость сканирования [5]. Также следует учитывать, что с увеличением мощности лазера может наблюдаться избирательное испарение легирующих элементов с низкой температурой кипения (например, цинк и магний), что может приводить к изменению фазового состава осаждаемого сплава [6].

Большие значения коэффициента температурного расширения и интервалов кристаллизации деформируемых сплавов на основе алюминия и магния в отличие от литейных Al-Si-Mg сплавов при высокой скорости охлаждения в процессе лазерного осаждения могут приводить к высокому уровню остаточных напряжений и вызывать кристаллизационные трещины из-за усадки при затвердевании. Поэтому большая часть исследований процессов лазерного осаждения алюминиевых сплавов выполняется с использованием сплавов на основе системы Al-Si, особенно традиционных литейных сплавов типа AlSi10Mg [7]. Деформируемые алюминиевые сплавы на основе системы Al-Mg, так же как и Al-Cu, Al-Zn сплавы, обладают широкими интервалами кристаллизации и высокой чувствительностью к образованию трещин, но их высокие механические свойства открывают большие возможности для исследований [1, 6].

Образование дефектов, вызванных усадочными процессами при кристаллизации, обезлегированием осаждаемого слоя и остаточными напряжениями, является одной из основных причин, сдерживающих широкое применение методов лазерного осаждения сплавов на основе алюминия и магния для ремонта и восстановления деталей. Традиционные методы обнаружения дефектов, которые включают испытания с использованием газовых или жидких сред с повышенным или пониженным давлением, во многих случаях нарушают целостность детали и являются разрушающими [8]. Методы контроля качества поверхности и свойств деталей из алюминий-магниевых сплавов, основанные на анализе макро- и микроструктуры срезов (шлифов), дают лишь ограниченную информацию о структуре отдельных срезов и также нарушают целостность испытываемых деталей. Помимо этого, процесс механической обработки и полирования в некоторых случаях изменяет структуру материала, осаждаемого на поверхность детали или в технологический паз [9].

В связи с этим для оценки качества ремонта деталей из алюминиевых и магниевых сплавов после лазерного осаждения целесообразно использовать методики контроля структуры осаждаемого слоя без повреждения целостности детали, обеспечивающие возможность сравнительного анализа информации, которую дают методы физических испытаний с численными методами компьютерного моделирования структуры и свойств детали [10].

Методика исследования

Исследования микроструктуры осаждаемых слоев проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA II LMU. Для получения информации о дефектах структуры осаждаемого слоя использовали результаты обработки послойных изображений, полученных при компьютерной томографии (КТ-сканировании) деталей из алюминий-магниевых сплавов с применением рентгенографического томографа Nikon XT H 225 (рис. 1).

Контроль размерных характеристик осаждаемого слоя выполняли с использованием координатно-измерительной машины Nikon с бесконтактной лазерной системой сканирования поверхности детали

(рис. 2, а). Измерения микротвердости проводили с использованием микротвердомера ПМТ-3 по шкале Виккерса. Контроль твердости слоя осажденного материала после ремонта (восстановления) деталей из алюминий-магниевых сплавов обеспечивали с помощью твердомера Mitutoyo HR-530 (рис. 2, б).

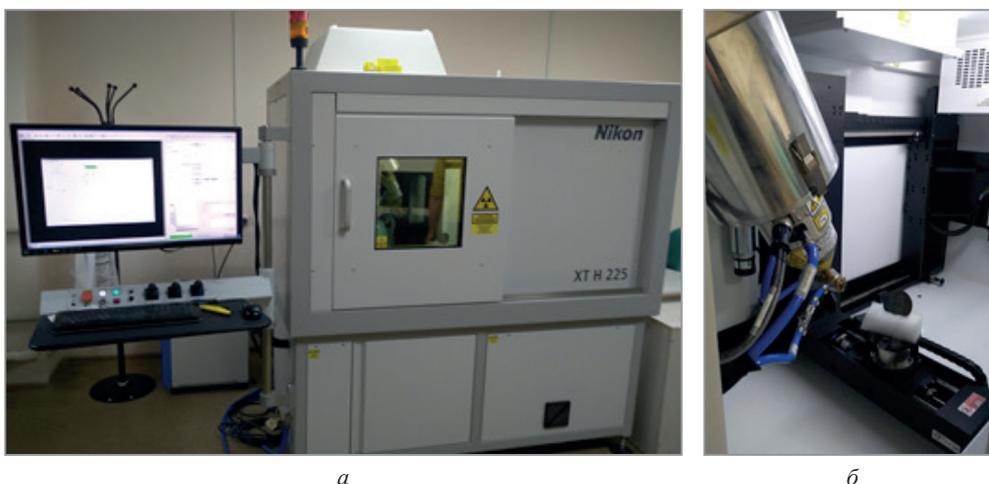


Рис. 1. Общий вид компьютерного томографа Nikon XT H 225 (а) и камеры для рентгенографического исследования (б) для неразрушающего контроля деталей из алюминий-магниевых сплавов после восстановления методом лазерного осаждения

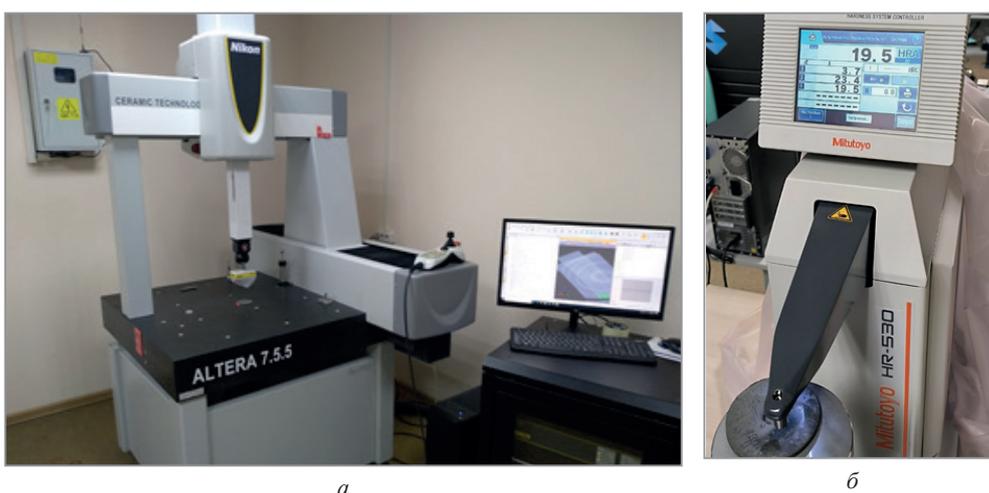


Рис. 2. Общий вид координатно-измерительной машины Nikon с лазерной системой сканирования поверхности детали (а) и твердомера Mitutoyo HR-530 (б)

Методика численного моделирования процессов лазерного осаждения алюминий-магниевых сплавов приведена в работе [6]. Методика расчетов основана на математических моделях, описывающих взаимосвязи между параметрами лазерной обработки (мощность лазера, скорость лазерного сканирования), геометрическими параметрами расплавленной зоны осаждаемого (легирующего) слоя и температурой. С учетом имеющейся [11, 12] информации о теплофизических свойствах алюминия, магния и Al-Mg-сплавов проведен численный анализ тепловых процессов при лазерном осаждении.

Лазерную обработку поверхности образцов сплавов на основе алюминия и магния проводили методом лазерного осаждения порошковых материалов в Шеньянском аэрокосмическом институте (КНР). Химический состав сплавов на основе алюминия и магния приведен в табл. 1, 2.

Таблица 1. Химический состав образцов сплавов на основе алюминия

Химический элемент	Si	Mg	Ti	Mn	Zr	Sn	Pb	Al
Массовая доля, %	6,5–7,5	0,45–0,75	0,1–0,2	<0,1	<0,2	<0,01	<0,03	ост.

Таблица 2. Химический состав образцов сплавов на основе магния

Химический элемент	Al	Zn	Zr	Nd	Si	Cu	Fe	Ni	Be	Mg
Массовая доля, %	0,02	0,1–0,7	0,4–1,0	2,0–2,8	0,01	0,03	0,01	0,005	0,001	ост.

Результаты исследований и их обсуждение

Внешний вид исследованных образцов сплавов на основе алюминия и микроструктура осажденных после поверхностной лазерной обработки слоев показаны на рис. 3. Полученные лазерным осаждением слои при использовании материалов на основе алюминия представлены структурой сплавленных частиц металлической и оксидных фаз, образующих характерный при лазерной обработке поверхностный рельеф (рис. 3, *а*). Данные сканирующей электронной микроскопии поперечных срезов образцов свидетельствуют об отсутствии дефектов (несплошностей, разрывов, сколов) на границе раздела «осаженный слой – поверхность подложки образца», которая характеризуется сложной геометрией, с зонами (областями) взаимного проникновения материалов образца и осажденного покрытия со средней толщиной 200–250 мкм (рис. 3, *в*), с хорошо различимыми границами сплавления отдельных частиц осаждаемого материала (рис. 3, *з*).

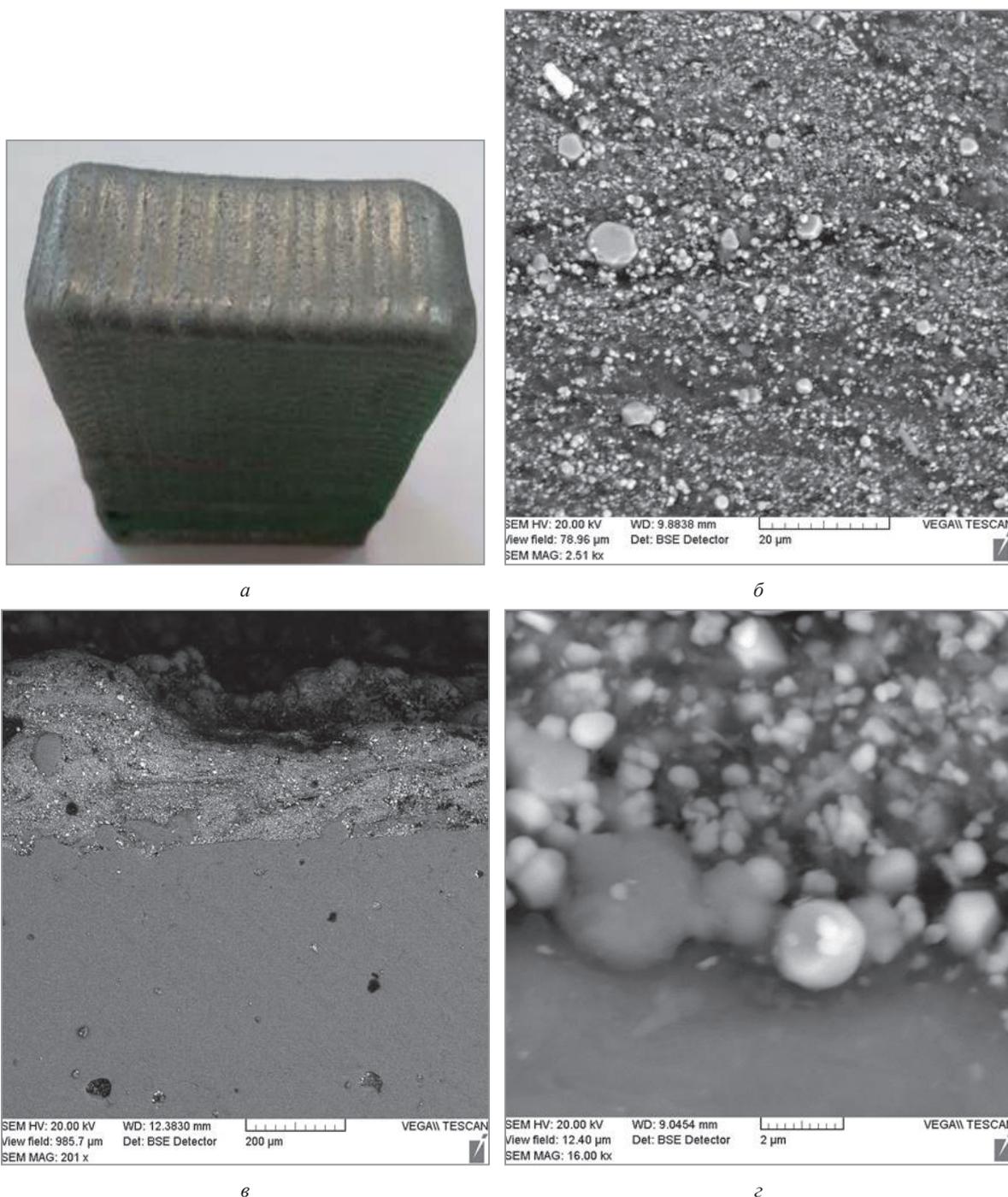


Рис. 3. Образец сплава на основе алюминия (*а*); структура его поверхности (*б*) после лазерного осаждения; результаты сканирующей электронной микроскопии (*в*, *з*) осажденного слоя (поперечный срез) на основе алюминия (от отраженных электронов, при различном увеличении: *в* – $\times 201$; *з* – $\times 16000$)

Внешний вид исследованных образцов сплавов на основе магния с осажденным слоем материала в поверхностный технологический паз и результаты сканирующей электронной микроскопии границы раздела осажденного слоя и подложки после поверхностной лазерной обработки (осаждения) порошкового материала на основе магния показаны на рис. 4.

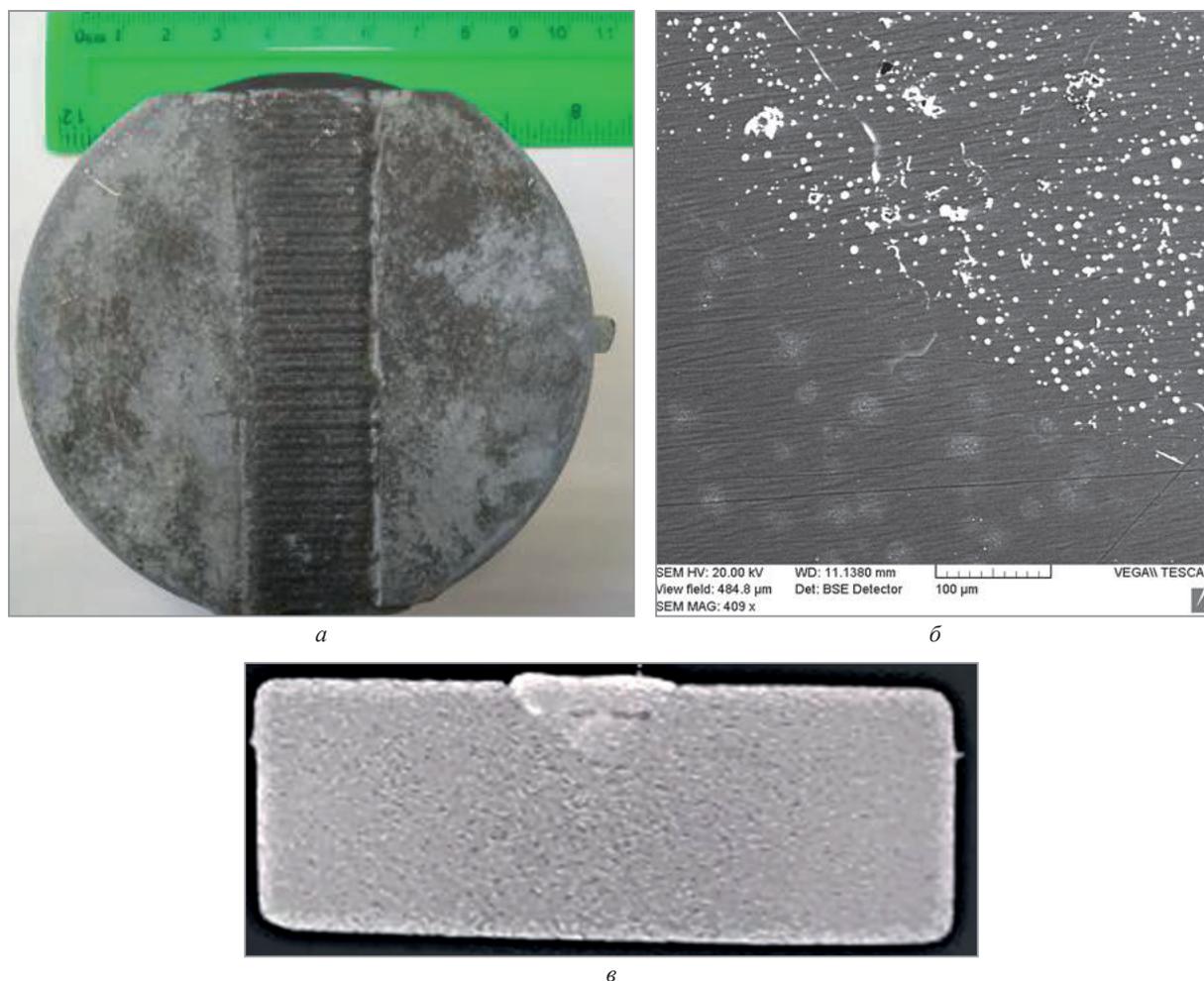


Рис. 4. Образец сплава на основе магния с осажденным слоем материала в поверхностный технологический паз (а); результаты сканирующей электронной микроскопии границы раздела осажденного слоя и подложки (б); результаты компьютерной томографии (в) образца сплава в поперечном сечении

Установлено, что осажденный слой материала характеризуется металлической структурой сплава на основе магния с относительно равномерным распределением оксидных и интерметаллических включений различной морфологии (рис. 4, б). При этом зона сплавления материала осажденного слоя с поверхностью подложки образца не имеет четко выраженной границы сплавления и характеризуется отсутствием дефектов микроструктуры.

Анализ результатов компьютерной томографии образцов сплавов на основе магния показал, что в процессе лазерного осаждения порошкового материала в технологические пазы на границе раздела «осажденный слой – подложка» и в центральном сечении осажденного слоя формируется зона внутренней пористости (рис. 4, в), появление которой объясняется усадочными процессами при затвердевании расплавленного металлического материала в полузамкнутых объемах технологических пазов.

Результаты измерения микротвердости сплавов после лазерного осаждения приведены в табл. 3, 4.

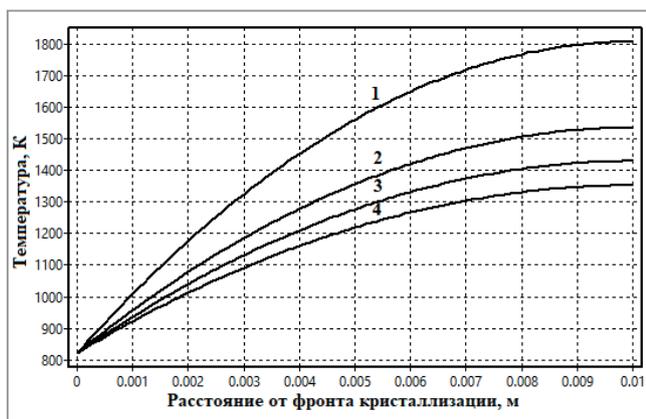
Анализ результатов численного моделирования процесса лазерного осаждения алюминий-магниевых сплавов показывает, что влияние размерных параметров осаждаемого слоя на температуру ванны расплава и значения температурного градиента на границе с фронтом кристаллизации является весьма значительным [6]. Например, при лазерном осаждении сплава $Al_{33,3}Mg_{66,7}$ (рис. 5) на поверхность подложки и эффективной мощности лазерного излучения 500 Вт с уменьшением ширины осаждаемого слоя с 12 до 5 мм максимальная температура увеличивается на 456,1 К (от 1352,2 до 1808,3 К), а температурный градиент на границе с фронтом кристаллизации осаждаемого слоя при этом возрастает в 2 раза (от 10^5 до $2 \cdot 10^5$ К/м).

Таблица 3. Результаты измерения микротвердости образцов сплавов на основе алюминия после лазерного осаждения

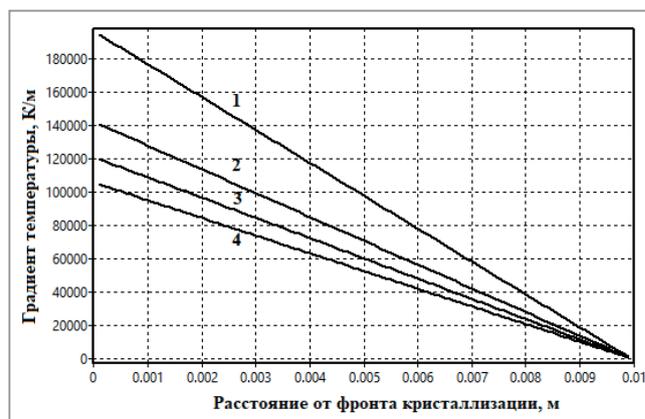
Участок испытаний	Номер испытания	Микротвердость (μHV), МПа	Среднее значение (μHV), МПа	Доверительный интервал (μHV), МПа
Осажденный слой	1	620	538,4	205,1
	2	463,4		
	3	398		
	4	672		
Подложка (основа)	1	515	448,2	82,9
	2	414		
	3	400,5		
	4	463,4		

Таблица 4. Результаты измерения микротвердости образцов сплавов на основе магния после лазерного осаждения

Участок испытаний	Номер испытания	Микротвердость (μHV), МПа	Среднее значение (μHV), МПа	Доверительный интервал (μHV), МПа
Осажденный слой	1	677,8	685,2	45,4
	2	648		
	3	706,2		
	4	708,8		
Подложка (основа)	1	601,1	605,7	49,6
	2	576		
	3	596		
	4	649,5		



а



б

Рис. 5. Влияние ширины осаждаемого слоя на распределение температуры (а) и температурный градиент (б) в жидкой зоне при лазерном осаждении сплава $\text{Al}_{33,3}\text{Mg}_{66,7}$ при эффективной мощности лазерного излучения 500 Вт: 1 – 5 мм; 2 – 8; 3 – 10; 4 – 12 мм

Моделирование распределения напряжений и деформаций при поверхностной обработке деталей методами лазерного осаждения материалов проводили на основе конечно-элементных моделей со слоями осажденного Al–Mg материала. Конечно-элементные модели экспортировали в систему имитационного моделирования с заданными структурно-геометрическими параметрами элементов (пластины, осаждаемого материала, траектории сварки, поверхностной сетки, начального элемента, начальной и конечной точки, точки закрепления) для моделирования процесса лазерного осаждения материала на поверхность подложки и в технологический паз (рис. 6).

Источник теплового воздействия был адаптирован специально для условий лазерного осаждения материала на поверхность и в технологический паз подложки. Условия закрепления детали были выбраны жесткие, по периферии пластины. Задание свойств материалов, используемых в процессах лазерного осаждения, осуществляли с учетом температурных зависимостей теплофизических и физико-механических свойств для сплава с содержанием магния 0,6–0,95 мас. %, кремния – 0,7–1,0, титана – до 0,3, цинка – до 0,5 и марганца – до 0,4 мас. %. Коэффициент Пуассона в расчетах был принят равным 0,33.

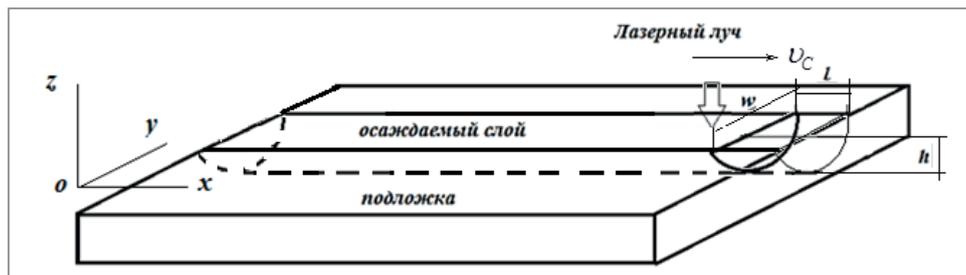


Рис. 6. Геометрические параметры осаждаемого слоя при осаждении материала в технологический паз подложки (l , h , w – длина, высота и ширина ванны расплава)

Установлено, что характер распределения деформаций и напряжений в области термического воздействия различается в случаях осаждения материала на поверхность подложки и в технологический паз (рис. 7, 8).

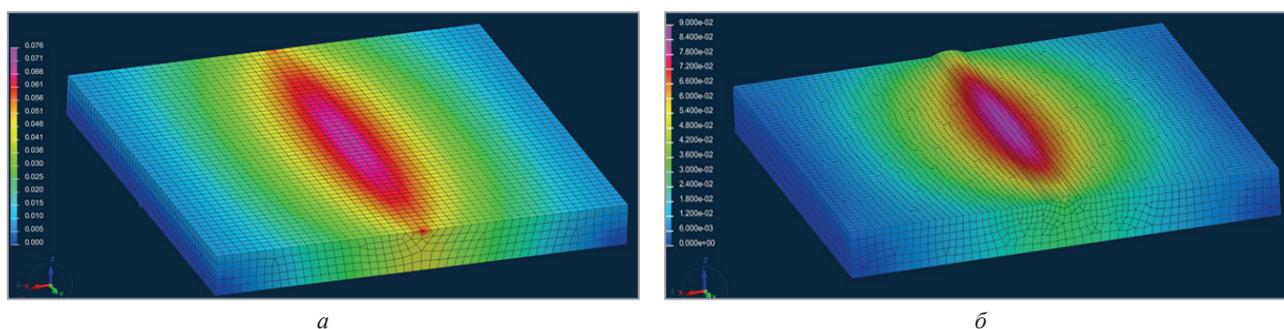


Рис. 7. Распределение деформаций после окончания процесса лазерного осаждения сплава с содержанием магния 0,6–0,95 мас. %, кремния – 0,7–1,0, титана – до 0,3, цинка – до 0,5 и марганца – до 0,4 мас. %:
 а – осаждение в технологический паз подложки; б – осаждение на поверхность подложки

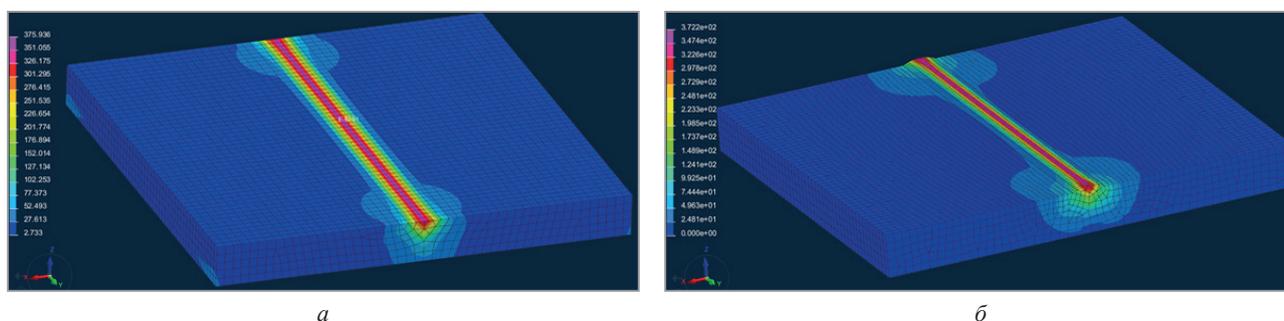


Рис. 8. Распределение максимальных эквивалентных напряжений после окончания процесса лазерного осаждения сплава с содержанием магния 0,6–0,95 мас. %, кремния – 0,7–1,0, титана – до 0,3, цинка – до 0,5 и марганца – до 0,4 мас. %:
 а – осаждение в технологический паз подложки; б – осаждение на поверхность подложки

Полученные результаты отражают картину распределения деформаций и напряжений при использовании различных технологических процессов лазерного осаждения алюминий-магниевых сплавов при их восстановлении и позволяют получить сравнительные оценки влияния способа обработки промышленных деталей перед проведением реального процесса восстановления или ремонта, прогнозировать возникающие деформации и минимизировать брак изделий.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект T22КИТГ-017 «Исследование и разработка процессов лазерного осаждения для ремонта деталей из алюминий-магниевых сплавов».

ЛИТЕРАТУРА

1. Review on laser directed energy deposited aluminum alloys / T. S. Liu [et al.] // Int. J. Extrem. Manuf. – 2024. – Vol. 6 (022004). – P. 48.
2. Progress of laser surface treatment on magnesium alloy / S. Zhang [et al.] // Front. Chem. – 2022. – Vol. 10 (999630). – P. 16.

3. **Tan, C. Y.** Influence of laser parameters on the microstructures and surface properties in laser surface modification of biomedical magnesium alloys / C. Y. Tan, C. Wen, H. Q. Ang // *Journal of Magnesium and Alloys*.– 2024.– Vol. 12.– P. 72–97.
4. Reliability of laser welding process for ZE41A-T5 magnesium alloy sand castings / H. Al-Kazzaz [et al.] // *Materials Transactions*.– 2008.– Vol. 49, no. 4.– P. 774–781.
5. Research on the microstructure and mechanical properties of repaired 7N01 aluminum alloy by laser-directed energy deposition with Sc modified Al-Zn-Mg / J. Chen [et al.] // *Metals*.– 2023.– Vol. 13, iss. 829.– 13 p.
6. Процессы лазерного осаждения для ремонта деталей из алюминий-магниевых сплавов / Б. М. Неменёнок [и др.] // *Литейное производство и металлургия 2023. Беларусь: труды 31-й Междунар. науч.-техн. конф.*– Минск, 2023.– С. 142–149.
7. Laser metal deposition of AlSi10Mg with high build rates / F. Hermann [et al.] // *Procedia CIRP 111, 12th CIRP Conference on Photonic Technologies, 4–8 September 2022, Fürth*.– 2022.– P. 210–213.
8. Assessing cast aluminum alloys with computed tomography defect metrics: a gurson porous plasticity approach / A. Gul, O. Aslan, E. S. Kayali [et al.] // *Metals*.– 2023.– No. 13 (752).– 20 p.
9. Advanced computed tomography system for the inspection of large aluminium car bodies / M. Simon [et al.] // *NDT.net Issue*.– 2006.– No. 11.– 9 p.
10. Tomography analysis of Al–Mg alloys manufactured by wire-arc directed energy deposition with different metal transfer modes / E. Aldalura, A. Suáreza, F. Veiga [et al.] // *Alexandria Engineering Journal*.– 2023.– No. 82.– P. 168–177.
11. Thermophysical properties of some liquid binary Mg-based alloys / Y. Plevachuk [et al.] // *J. Min. Metall. Sect. B-Metall*.– 2017.– Vol. 53 (3) B.– P. 279–284.
12. Thermophysical properties of liquid aluminum / M. Leitner [et al.] // *Metallurgical and Materials Transactions A*.– 2017.– Vol. 48A.– P. 3036–3045.

REFERENCES

1. **Liu T. S., Chen P., Qiu F. [et al.]**. Review on laser directed energy deposited aluminum alloys. *Int. J. Extrem. Manuf.*, 2024, vol. 6 (022004), p. 48.
2. **Zhang S., Jiang J., Zou X. [et al.]**. Progress of laser surface treatment on magnesium alloy. *Front. Chem.*, 2022, vol. 10 (999630), p.16.
3. **Tan C. Y., Wen C., Ang H. Q.** Influence of laser parameters on the microstructures and surface properties in laser surface modification of biomedical magnesium alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2024, vol. 12, pp. 72–97.
4. **Al-Kazzaz H., Cao X., Jahazi M., Medra M.** Reliability of laser welding process for ZE41A-T5 magnesium alloy sand castings. *Materials Transactions*, 2008, vol. 49, no. 4, pp. 774–781.
5. **Chen J., Yu S., Yang J. [et al.]** Research on the microstructure and mechanical properties of repaired 7N01 aluminum alloy by laser-directed energy deposition with Sc modified Al-Zn-Mg. *Metals*, 2023, vol. 13, iss. 829, p. 13.
6. **Nemenenok B. M., Rafalsky I. V., Lushchik P. E., Devoino O. G.** Processy lazernogo osazhdeniya dlya remonta detalej iz alyuminij-magnievyyh spлавov [Laser deposition processes for repairing parts made of aluminum-magnesium alloys]. *Litejnoe proizvodstvo i metallurgiya 2023. Belarus': trudy 31 Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Foundry and metallurgy 2023. Belarus: Proceedings 31st Int. scientific and technical conferences*. Minsk, BNTU Publ., 2023, pp. 142–149.
7. **Hermann F., Vogt S., Gobel M. [et al.]** Laser metal deposition of AlSi10Mg with high build rates. *Procedia CIRP 111, 12th CIRP Conference on Photonic Technologies, 4–8 September 2022, Fürth*, pp. 210–213.
8. **Gul A., Aslan O., Kayali E. S. [et al.]** Assessing cast aluminum alloys with computed tomography defect metrics: a gurson porous plasticity approach. *Metals*, 2023, no. 13 (752), p. 20.
9. **Simon M., Tiseanu I., Sauerwein C. [et al.]**. Advanced computed tomography system for the inspection of large aluminium car bodies. *NDT.net Issue*, 2006, no. 11, 9 p.
10. **Aldalura E., Suáreza A., Veiga F. [et al.]**. Tomography analysis of Al–Mg alloys manufactured by wire-arc directed energy deposition with different metal transfer modes. *Alexandria Engineering Journal*, 2023, no. 82, pp. 168–177.
11. **Plevachuk Y. [et al.]**. Thermophysical properties of some liquid binary Mg-based alloys. *J. Min. Metall. Sect. B-Metall*, 2017, vol. 53 (3) B, pp. 279–284.
12. **Leitner M. [et al.]**. Thermophysical properties of liquid aluminum. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, vol. 48A, pp. 3036–3045.