

Научная статья

УДК 669.721.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-37-47

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И МЕТОДЫ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ (обзор)

З.П. Уридия<sup>1</sup>, М.С. Токарев<sup>1</sup>, А.А. Леонов<sup>1</sup>, Н.В. Трофимов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Рассмотрены тенденции современных технологий изготовления магниевых сплавов и изделий из них. Представлены результаты исследований и разработанных технологий зарубежных ученых и мировых компаний в области магниевых сплавов и материалов на основе магния. Исследования сосредоточены на селективном лазерном сплавлении (СЛС), поскольку с его помощью возможно формировать высокоточные детали любой формы. Тонкодисперсные порошки из магния или магниевое сплава, используемые для СЛС, трудно изготовить из-за их быстрого окисления. В связи с данной особенностью все больше внимания уделяется технологии с использованием проволоки. В обзоре рассмотрены такие технологии, как лазерная наплавка и газодинамическое напыление. Представленные исследования и разработки позволят расширить области применения и в перспективе освоить усовершенствованные традиционные и современные перспективные аддитивные технологии.

**Ключевые слова:** магниевый сплав, аддитивное производство, селективное лазерное сплавление, лазерная наплавка и распыление, газодинамическое напыление

**Для цитирования:** Уридия З.П., Токарев М.С., Леонов А.А., Трофимов Н.В. Тенденции развития современных технологий изготовления и методы усовершенствования свойств поверхности магниевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 11 (117). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-37-47.

Scientific article

## TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF MODERN MANUFACTURING TECHNOLOGIES AND METHODS FOR IMPROVING THE SURFACE PROPERTIES OF MAGNESIUM ALLOYS (review)

Z.P. Uridiya<sup>1</sup>, M.S. Tokarev<sup>1</sup>, A.A. Leonov<sup>1</sup>, N.V. Trofimov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The trends of modern technologies for the manufacture of magnesium alloys and products from them are considered. The results of research and developed technologies of foreign scientists and world companies in the field of magnesium alloys and magnesium-based materials are presented. Research is focused on selective laser melting (SLM), since it is possible to form high-precision parts of any shape with it help. The fine magnesium or magnesium alloy powders used for SLM are difficult to manufacture due to their rapid oxidation. In connection with this feature, more and more attention is paid to the technology of using wire. The review considers such technologies as laser cladding and gas-dynamic spraying. The presented research and development will expand the scope of application and, in the future, master improved traditional and modern promising additive technologies.

**Keywords:** *magnesium alloy, additive manufacturing, selective laser melting, laser cladding and sputtering, gas-dynamic spraying*

**For citation:** Uridiya Z.P., Tokarev M.S., Leonov A.A., Trofimov N.V. Trends in the development of modern manufacturing technologies and methods for improving the surface properties of magnesium alloys (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-37-47.

### Введение

Магниевого сплавы благодаря своим уникальным характеристикам (низкая плотность, высокая удельная прочность, хорошая демпфирующая способность и др.) имеют большой потенциал для применения в авиационной, аэрокосмической, автомобильной и электронной промышленности. Однако из-за недостаточно высокой жидкотекучести из магниевых сплавов трудно изготовить отливки сложной геометрической конфигурации. Применение магниевых сплавов также ограничено для деталей, подверженных сильному трению, износу и воздействию агрессивных сред, из-за низкой твердости поверхности и невысокой коррозионной стойкости.

Аддитивное производство, как передовая технология, представляет интерес, поскольку является процессом, позволяющим создавать объект соединением материала (слой за слоем) по данным трехмерной модели. Преимуществом аддитивного производства деталей, по сравнению с традиционной технологией, является отсутствие необходимости в изготовлении литейной формы.

Для устранения поверхностных дефектов на отливках из магниевых сплавов рекомендуется использовать методы плакирования или поверхностного легирования, а также газодинамическое напыление.

### 3D-печать из магния и его сплавов

С развитием технологии аддитивного производства и в связи с высоким спросом на высококачественные детали из магниевых сплавов проведен анализ научно-технической литературы в области производства магния и его сплавов [1–13]. Исследования сосредоточены на селективном лазерном сплавлении (СЛС), поскольку с его помощью возможно формировать высокоточные детали любой формы. Однако из-за низкой скорости осаждения и ограниченного размера устройства затруднено изготовление крупномасштабных деталей из магниевых сплавов. Кроме того, тонкодисперсные порошки из магния или магниевых сплавов, используемые для СЛС, трудно изготовить из-за их быстрого окисления, что может привести к возгоранию. В связи с данной особенностью все больше внимания уделяется технологии с использованием проволоки [14].

В технологии аддитивного производства проволоки (WAAM) в качестве исходного сырья используется металлическая проволока, электрическая дуга – в качестве источника тепла, а также станки с числовым программным управлением – для системы движения. Этот метод обеспечивает высокую производительность и отсутствие ограничений по размерам формируемых деталей и используется при производстве стали, титановых и алюминиевых сплавов. Для магниевых сплавов марки AZ31 опробован процесс переноса холодного металла WAAM–СМТ (СМТ – это модифицированный процесс газовой дуговой сварки, при котором проволока намеренно втягивается в сопло устройства подачи проволоки после возникновения короткого замыкания, что приводит к снижению интенсивности теплового потока во время плавления и затвердевания металла, поэтому процесс СМТ обладает большим потенциалом для аддитивного производства магниевых сплавов из-за его низкой температуры плавления).

В работах [15, 16] на примере образца из сплава AZ31, осажденного методом WAAM–СМТ, подробно обсуждается эволюция микроструктуры и ее влияние на механические свойства сплава.

В качестве присадочного материала использовали проволоку диаметром 1,2 мм из магниевого сплава AZ31, имеющего следующий химический состав, определенный с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой:

| Содержание элементов, % (по массе) |      |      |     |       |       |         |         |
|------------------------------------|------|------|-----|-------|-------|---------|---------|
| Mg                                 | Al   | Zn   | Mn  | Si    | Cu    | Fe      | Ni      |
| Основа                             | 2,54 | 0,67 | 0,4 | 0,027 | 0,021 | 0,00089 | 0,00073 |

В качестве подложки использовали прокатный лист из сплава AZ31 размером 250×40×8 мм. Стенку образца из сплава AZ31 наплавляли с помощью метода WAAM. Схема системы холодного переноса металла (WAAM–CMT) представлена на рис. 1.

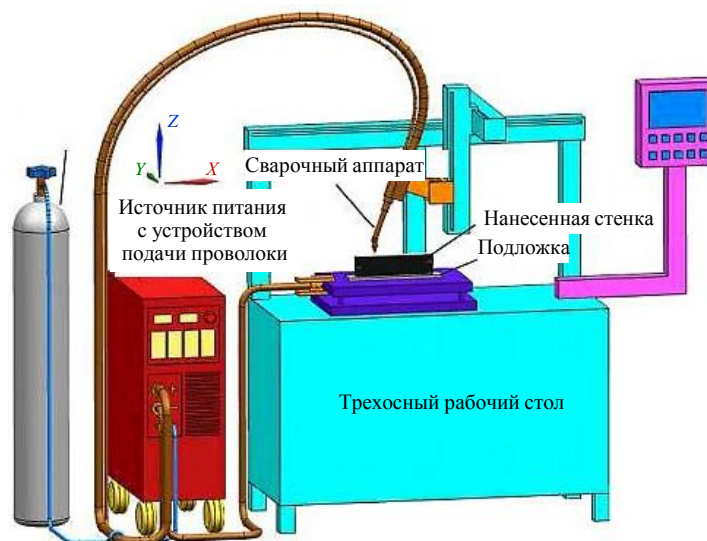


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки, разработанной для процесса холодного переноса металла (WAAM–CMT)

Внешний вид отпечатанной стенки представлен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид тонкой стенки из магниевого сплава AZ31, наплавленной с помощью процесса холодного переноса металла (WAAM–CMT)

Образец из сплава AZ31 представлен послойно собранными элементами (рис. 3). В средней части образца – множество равномерных канавок, параллельных направлению движения  $X$ . Толщина каждого слоя в среднем  $\sim 2,26$  мм. В верхней и нижней части образца наблюдаются выпуклость и коллапс, вызванный различием энергии теплового потока. Микроструктура каждого слоя (кроме верхнего) состоит из последовательно расположенных столбчатых дендритов (рис. 3, в–е). Верхний слой представляет собой

равноосные дендриты (рис. 3, а, б). В связи с дендритным строением структуры наблюдается тенденция к анизотропии микротвердости и механических свойств (см. таблицу).

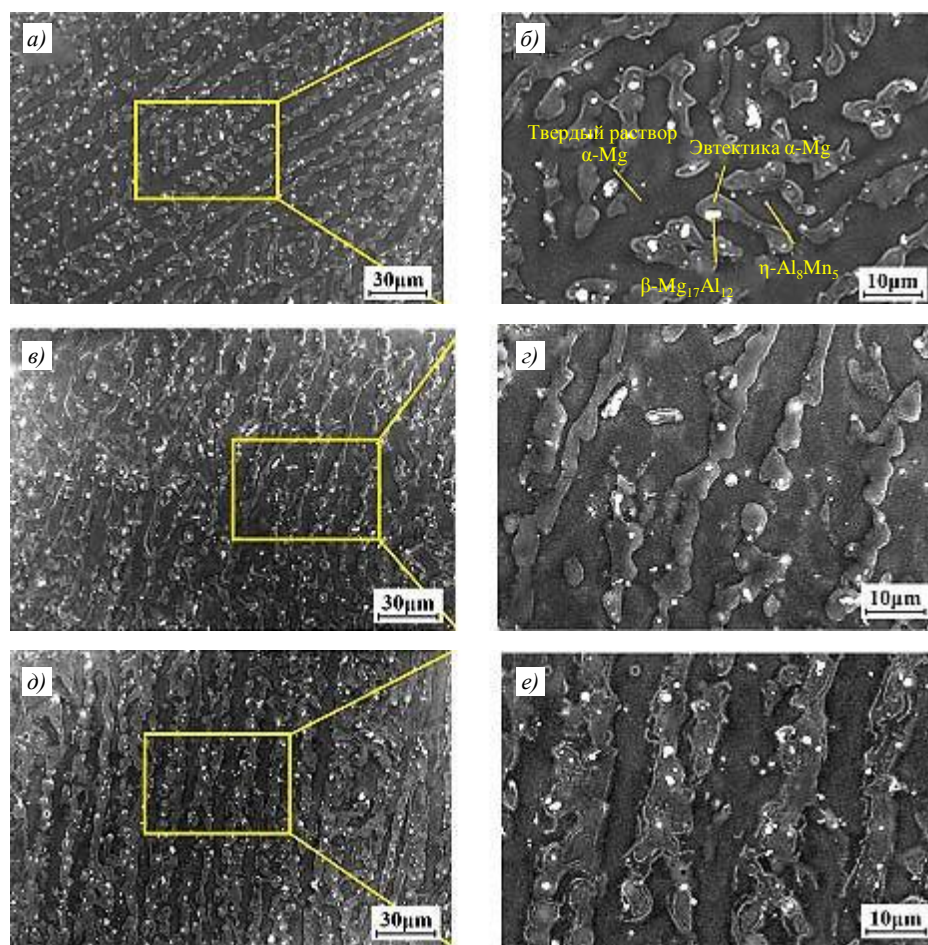


Рис. 3. Микроструктура с разной степенью увеличения продольного сечения (плоскость XZ) тонкой стенки образца из магниевого сплава AZ31: а, б – верхняя область; в, г – средняя область; д, е – нижняя область

**Прочность при растяжении тонкой стенки образца из магниевого сплава AZ31, полученного в процессе переноса холодного металла (WAAM–СМТ), в сравнении с кованным и литым состоянием**

| Условия изготовления                           | Предел прочности при растяжении, МПа | Предел текучести, МПа | Удлинение, % |
|--|--------------------------------------|-----------------------|--------------|
| WAAM–СМТ (направление строительства – линия Z) | 210                                  | 131,5                 | 10,5         |
| WAAM–СМТ (направление движения – линия X)      | 152                                  | 71,0                  | 7,5          |
| Кованный сплав                                 | 234                                  | 131,0                 | 6,0          |
| Литой сплав                                    | 152                                  | 71,0                  | 4,8          |

**Традиционное изготовление магниевых сплавов**

В настоящее время на металлургических предприятиях широко применяется метод гравитационного литья магниевых сплавов. Технологические процессы плавки магниевых сплавов как под защитой флюсов, так и при перспективной бесфлюсовой

плавке в защитной атмосфере при литье в кокиль с внутренними песчаными стержнями и в формы из песчано-глинистых и холоднотвердеющих смесей, освоены на предприятиях отрасли и позволяют получать крупногабаритные отливки.

### **Методы совершенствования свойств поверхности магниевых сплавов**

По данным литературных научно-технических источников [17–19], на протяжении XX в. распространенным способом устранения литейных дефектов на поверхности отливок из магниевых сплавов являлся метод аргоно-дуговой заварки. В настоящее время получили развитие такие методы, как заварка неплавящимся электродом в среде защитных инертных газов, сварка плавящимся электродом в среде защитных газов, контактная точечная сварка и сварка трением с перемешиванием.

К методам совершенствования свойств поверхности можно отнести лазерную наплавку и газодинамическое напыление тонкодисперсных порошков.

### **Лазерная наплавка и распыление магниевых сплавов**

Поверхность магниевого сплава может быть улучшена путем плакирования или поверхностного легирования. Лазерная плакировка – это метод, при котором более прочный материал наносится либо методом предварительного размещения, либо методом синхронной подачи порошков на поверхность материала подложки с целью улучшения эксплуатационных характеристик сплава. Лазерная плакировка и лазерное легирование являются общими терминами, но между поверхностной плакировкой и поверхностным легированием существует разница. Наплавка – это процесс нанесения твердого и износостойкого материала на поверхность более мягкого материала подложки без ее плавления или оплавления со степенью смешения <5 %. В случае поверхностного легирования материал покрытия и часть материала подложки расплавляются и перемешиваются, образуя новый слой со степенью смешения >5 %.

Одна и та же установка может быть использована для наплавки и легирования поверхности. Различаются параметры процесса, влияющие на качество плакированного или легированного слоя. К ним относятся: мощность лазера, скорость сканирования, диаметр лазерного пятна, расход аргона и частота лазерного луча. Для плакировки и легирования используются определенные типы маломощных лазеров. Применение лазеров высокой мощности может привести к испарению подложки из магниевого сплава.

При проведении литературного научно-технического анализа выявлены разработки в области металлических покрытий, сплавов, композитных покрытий с металлической матрицей и покрытий с добавлением оксида редкоземельного элемента, а также покрытий, армированных наночастицами, и др.

Для плакирования магниевого сплава используют: Al, Ti, Si, Co, Cr, Fe, Zn, Zr, Ni и Cu и сплавы этих металлов. Наиболее широко используется алюминий, так как его физические характеристики схожи с характеристиками магниевых сплавов. Для покрытий используются керамические материалы: TiB<sub>2</sub>, TiC, WC, SiC, TiN, а также оксиды металлов: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

*Лазерную наплавку и легирование* осуществляют материалом в виде порошков; паст, в которых порошки предварительно смешаны со связующим, или проволоки. Способ подачи сырья может быть вертикальным, под углом 45 градусов к лучу лазера одновременно с подачей инертного газа или без него. Лазерный источник воздействует вертикально на поверхность материала и образуется слой покрытия, имеющий хорошую металлическую связь с подложкой и обладающий хорошими показателями твердости, износостойкости и коррозионной стойкости по сравнению с подложкой из магниевого сплава.



Выбор материала является сложной задачей. По этой причине для наплавки магниевого сплава следует выбирать материал, имеющий аналогичные физические свойства, хорошую смачиваемость, аналогичный температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) и почти такой же модуль упругости, что и магниевый сплав.

*Распыление связующего* – это процесс аддитивного производства, при котором капли жидкого связующего агента выборочно осаждаются для соединения частиц, распределенных по слою порошка. Одним из преимуществ распыления связующего является возможность изготавливать конструкции при комнатной температуре. При этом возможно включение органических, биологически активных или гидратированных молекул в основной объем. Процесс печати изделия осуществляется путем нанесения слоя порошка на рабочую пластину с последующим нанесением связующего вещества, которое затвердевает и связывает частицы вместе. Процесс повторяется слой за слоем, пока не будет получена желаемая геометрическая форма изделия. Струя связующего имеет идеальный размер частиц порошка в диапазоне 15–35 мкм и приблизительное разрешение 20–30 мкм [20–23].

*Распыление без связующего* – это процесс, при котором капиллярные силы в порошке действуют как связующее, удерживая частицы порошка (рис. 4). Для склеивания слоев чистого магниевого порошка используют растворитель. Осажденный материал подвергают спеканию при температуре 650 °С, после термической обработки деталь не имеет загрязнений от растворителя. Струйная печать без связующего используется для изготовления изделий из сплава системы Mg–Zn–Zr с пористостью 29 % и средним размером пор 15 мкм. Прочность такого материала прямо пропорциональна времени выдержки и продолжительности спекания. При использовании струйной обработки без связующего удалось достичь значений прочности при сжатии 174 МПа и модуля упругости 18 ГПа. Технология может применяться для изготовления изделий из композиционных материалов [24].

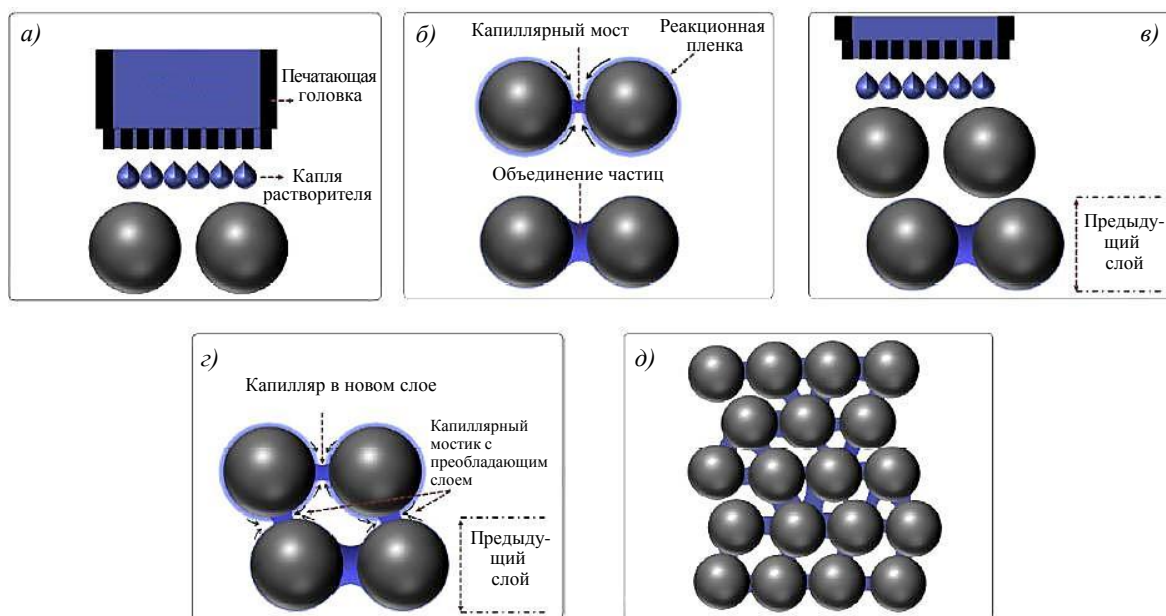


Рис. 4. Принцип струйного осаждения без связующего: *а* – осаждение растворителем; *б* – образование капиллярных мостиков между влажными частицами; *в* – растекание следующего слоя порошка; *г* – капиллярное действие с образованием мостиков между частицами в новом и предыдущем слоях; *д* – полностью развитая твердая структура, образующаяся после сушки и спекания

### Газодинамическое напыление тонкодисперсных порошков

Новым методом, впервые опробованным в отечественном производстве, является метод устранения литейных дефектов магниевого литья газодинамическим напылением тонкодисперсных порошков. Этот метод особенно перспективен при производстве крупногабаритных отливок сложной конфигурации. Образование покрытия происходит с помощью сверхзвукового сопла установки ДИМЕТ Д 404 (рис. 5), когда воздушно-порошковая струя под давлением направляется на поверхность отливки или детали, где ускоренные высокодисперсные частицы порошка образуют покрытие.

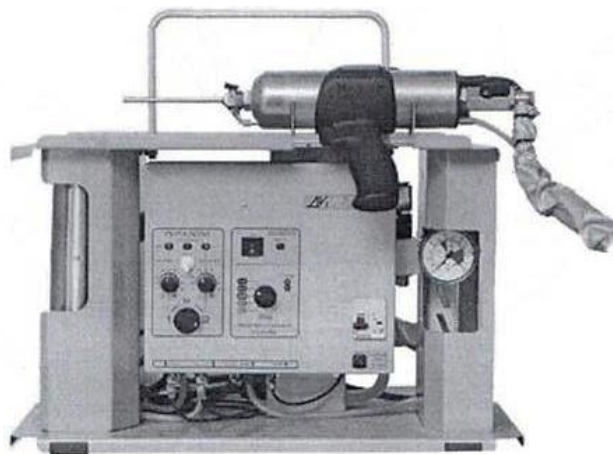


Рис. 5. Установка ДИМЕТ Д 404 для газодинамического напыления порошков

В качестве материалов для напыления на образцы из сплава МЛ5 выбраны три (№ 1–3) различные по составу высокодисперсные смеси алюминиевого порошка с разным содержанием (10; 20 и 30 %) электрокорунда ( $Al_2O_3$ ) и двухслойное покрытие, состоящее из слоя смеси алюминиевого порошка с электрокорундом и слоя чистого алюминия. Режим напыления для всех смесей выбран одинаковый. Для порошка из чистого алюминия гранулометрический состав составлял 95 % гранул размером от 5 до 50 мкм; для корунда: 25 % гранул размером от 10 до 25 мкм. Подготовку поверхности перед напылением проводили с помощью пескоструйной очистки. Как показали результаты испытаний, степень сцепления напыленного слоя с матрицей сплава МЛ5-Т4 высокая – отрыва напыленного слоя от основного материала и разрушения образцов не происходит, за исключением двухслойного покрытия состава:  $Al + Al_2O_3$  + слой порошка чистого алюминия.

Авторами данной статьи при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ исследована коррозионная стойкость образцов с покрытиями четырех составов в сравнении с базовыми образцами в камере солевого тумана (КСТ) при постоянной температуре 35 °С с распылением 5%-ного раствора NaCl в течение 72 ч, а также адгезия лакокрасочного покрытия к поверхности напыленных образцов. По результатам рентгеноструктурного фазового анализа и идентичности фазового состава четырех порошков следует считать оптимальным состав мелкодисперсного алюминиевого порошка:  $Al + 10 \% Al_2O_3$ .

После проведенного газодинамического напыления мелкодисперсной смеси выбранного состава на поверхности образца образовался плотный слой толщиной от 1,1 до 4,55 мм. Проведенный металлографический анализ позволил выявить в структуре покрытия три зоны: слой собственно покрытия, переходный слой между матрицей (основой сплава) и покрытием и поверхностный слой матрицы сплава. Структура матрицы

образца при этом не изменяется. В зоне сцепления напыленного покрытия с основным материалом при увеличении  $\times 50$  и  $\times 200$  несплошностей, пор, разрывов, трещин и других дефектов не обнаружено (рис. 6). Покрытие имеет однородную поверхность.

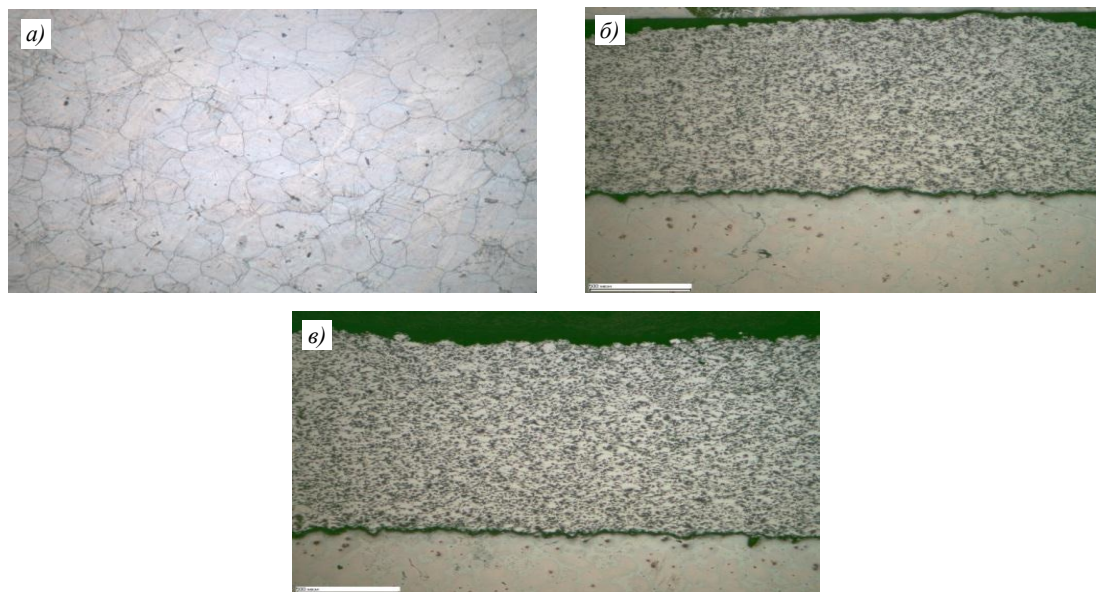


Рис. 6. Структура напыленного слоя: *a* – базовый образец сплава без напыления ( $\times 200$ ); *б*, *в* – зона сцепления напыленного покрытия ( $\times 50$ ) с основным материалом отливки при толщине напыленного слоя 1,1–1,2 (*б*) и 1,3–1,4 мм (*в*)

Исследованы механические свойства экспериментальных образцов, полученных методом напыления. Изготовлены плоские и цилиндрические базовые образцы без напыления и экспериментальные образцы с утонением стенки на 25 и 50 % от стандартной толщины. Экспериментальные образцы после утонения доведены до стандартных значений методом газодинамического напыления смеси состава: Al + 10 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Толщина напыленного слоя при 25 %-ном утонении составляла 2,2; 2,3 и 2,4 мм; при 50 %-ном утонении: 4,22–4,55 мм. Механические испытания при растяжении проводили по ГОСТ 1497–84. Средние значения предела прочности плоских базовых образцов без напыления составили 214–220 МПа, цилиндрических образцов: 208 МПа. При напылении 25 %-ного слоя от толщины базового образца предел прочности плоских образцов составил 210 МПа, цилиндрических образцов: 179 МПа. При напылении 50 % от толщины базового образца предел прочности цилиндрических образцов составил 115 МПа. Предел текучести при растяжении практически не изменился при различных толщинах напыленного слоя. Установлено повышение предела текучести при сжатии в среднем в 1,5–1,7 раза.

### Заключения

В связи с высоким спросом потребителей на высококачественные детали из магниевых сплавов весьма актуальными являются методы усовершенствования свойств поверхности отливок (деталей), позволяющие устранить поверхностные дефекты и улучшить их эксплуатационные характеристики.

Впервые разработанный для магниевых сплавов метод газодинамического напыления тонкодисперсных алюминиевых порошков на магниевые отливки по результатам исследований рекомендован для устранения поверхностных дефектов и негерметичности сложноконтурных отливок из сплава МЛ5.



Метод газодинамического напыления тонкодисперсных алюминиевых порошков на магниевые отливки имеет ряд преимуществ перед методом заварки дефектов и наплавки поверхности: отливка не подвергается технологическому нагреву, в результате чего не происходит коробления, изменения микроструктуры отливки и, как следствие, снижения механических свойств.

### Благодарности

Коллектив авторов выражает благодарность сотрудникам ИЦ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, участвовавшим в выполнении исследований и испытаний.

### Список источников

1. Каблов Е.Н., Белов Е.В., Трапезников А.В., Леонов А.А., Зайцев Д.В. Особенности упрочнения и кинетика старения литейного алюминиевого высокопрочного сплава на основе системы Al–Si–Cu–Mg // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.05.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
2. Каблов Е.Н., Акинина М.В., Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Леонов А.А. Исследование особенностей фазового состава и тонкой структуры литейного магниевых сплава МЛ19 в литом и термообработанном состояниях // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Каблов Е.Н., Лукина Е.А., Заводов А.В., Ефимочкин И.Ю. Формирование структуры твердых сплавов на основе системы WC–Co с субмикронным зерном в присутствии ингибирующих добавок // *Труды ВИАМ*. 2020. № 4–5 (88). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-45-89-99.
5. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. Развитие технологии направленной кристаллизации литейных высокожаропрочных сплавов с переменным управляемым температурным градиентом // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
6. Козлов И.А., Виноградов С.С., Тарасова К.Г., Кулюшина Н.В., Манченко В.А. Плазменное электролитическое окисление магниевых сплавов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 23–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-23-36.
7. Истомин А.В., Кольшев С.Г. Электростатический метод формования ультратонких волокон тугоплавких оксидов // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 40–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-40-46.
8. Song B., Dong S., Zhang B., Liao H., Coddet C. Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V // *Materials Desing*. 2012. No. 35. P. 120–125.
9. Takagi H., Sasahara H., Abe T. et al. Material-property evaluation of magnesium alloys fabricated using wire-and-arc-based additive manufacturing // *Additive Manufacturing*. 2018. No. 24. P. 498–507.
10. Wei K., Wang Z., Zeng X. Influence of element vaporization on formability, composition, microstructure, and mechanical performance of the selective laser melted Mg–Zn–Zr components // *Materials letters*. 2015. No. 156. P. 187–190.
11. Bär F., Berger L., Jauer L. et al. Laser additive manufacturing of biodegradable magnesium alloy WE43: a detailed microstructure analysis // *Acta Biomaterialia*. 2019. No. 98. P. 36–49.
12. Манакари В., Паранде Г., Гупта М. Селективное лазерное плавление порошков магния и магниевых сплавов. Обзор // *Металлы*. 2016. № 7. С. 2–3.
13. Lin X., Huang W. Highly efficient metal additive manufacturing technology applied in the field of aviation // *Materials China*. 2015. No. 34. P. 684–688.
14. Dong H., Yong B., Chjan D. et al. Experimental study of selective laser melting of bulk pure // *Manufacturing process*. 2015. No. 30. P. 1298–1304.
15. Guo J., Zhou Y., Liu K. et al. Additive manufacturing by magnesium alloy AZ31 wire arc: grain grinding by adjusting pulse frequency // *Materials*. 2016. No. 9. P. 823–824.

16. Knezovis N., Topis A. Additive production of wire and arc – new achievement in production // Springer international publishing. 2019. No. 36. P. 65–71.
17. Zhang H., Hu S., Wang Z., Liang Y. The effect of welding speed on the microstructures of the deposited coating of magnesium alloy AZ31 by cold metal transfer // *Materials Design*. 2015. No. 86. P. 894–901.
18. Hu S., Zhang H., Wang Z. et al. Arc characteristics during cold metal transfer welding with magnesium alloy wire AZ31 // *Journal Manufacturing process*. 2016. No. 24. P. 298–306.
19. Vyasraj M., Gururaj P., Manoj G. Selective Laser Melting of Magnesium and Magnesium Alloy Powders: A Review // *Metals*. 2016. No. 51. P. 1–35.
20. Vorndran E., Moseke C., Gbureck U. 3D printing of ceramic implants // *Materials Research Society Bulletin*. 2015. No. 40. P. 127–136.
21. Meininger S., Moseke C., Spatz K. et al. Effect of strontium substitution on the material properties and osteogenic potential of 3D powder printed magnesium phosphate scaffolds // *Materials Science and Engineering*. 2019. No. 98. P. 1145–1158.
22. Meininger S., Mandal S., Kumar A. et al. Strength reliability and in vitro degradation of three-dimensional powder printed strontium-substituted magnesium phosphate scaffolds // *Acta Biomaterialia*. 2016. No. 31. P. 401–411.
23. Salehi M., Maleksaeedi S., Sapari M.A.B. et al. Additive manufacturing of magnesium–zinc–zirconium (ZK) alloys via capillary-mediated binderless three-dimensional printing // *Materials Desing*. 2019. No. 169. P. 115–124.
24. Мухина И.Ю., Мухаметов А.А.-Х., Кошелев А.О. Устранение поверхностных литейных дефектов на отливках из магниевых сплавов методом газодинамического напыления // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2018. № 4. С. 34–39.

#### References

1. Kablov E.N., Belov E.V., Trapeznikov A.V., Leonov A.A., Zaitsev D.V. Strengthening features and aging kinetics of high-strength cast aluminum alloy AL4MS based on Al–Si–Cu–Mg system. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 11, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
2. Kablov E.N., Akinina M.V., Volkova E.F., Mostyaev I.V., Leonov A.A. The research of aspects of phase composition and fine structure of magnesium alloy ML9 in the as-cast and heat-treated conditions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
3. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Kablov E.N., Lukina E.A., Zavodov A.V., Efimochkin I.Yu. The formation of structure in ultrafine WC–Co carbide material in the presence of inhibitory additives. *Trudy VIAM*, 2020, no. 4–5 (88), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 05, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-45-89-99.
5. Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Echin A.B. Development of technology of cast superalloys directional solidification with variable controlled temperature gradient. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
6. Kozlov I.A., Vinogradov S.S., Tarasova K.G., Kulyushina N.V., Manchenko V.A. Plasma electrolytic oxidation of magnesium alloys (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 23–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-23-36.
7. Istomin A.V., Kolyshev S.G. Electrostatic method of forming ultrathin fibers of refractory oxides. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 40–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-40-46.
8. Song B., Dong S., Zhang B., Liao H., Coddet C. Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V. *Materials Desing*, 2012, no. 35, pp. 120–125.

9. Takagi H., Sasahara H., Abe T. et al. Material-property evaluation of magnesium alloys fabricated using wire-and-arc-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 2018, no. 24, pp. 498–507.
10. Wei K., Wang Z., Zeng X. Influence of element vaporization on formability, composition, microstructure, and mechanical performance of the selective laser melted Mg–Zn–Zr components. *Materials letters*, 2015, no. 156, pp. 187–190.
11. Bär F., Berger L., Jauer L. et al. Laser additive manufacturing of biodegradable magnesium alloy WE43: a detailed microstructure analysis. *Acta Biomaterialia*, 2019, no. 98, pp. 36–49.
12. Manakari V., Parande G., Gupta M. Selective laser melting of magnesium powders and magnesium alloys. Review. *Metally*, 2016, no. 7, pp. 2–3.
13. Lin X., Huang W. Highly efficient metal additive manufacturing technology applied in the field of aviation. *Materials China*, 2015, no. 34, pp. 684–688.
14. Dong H., Yong B., Chjan D. et al. Experimental study of selective laser melting of bulk pure. *Manufacturing process*, 2015, no. 30, pp. 1298–1304.
15. Guo J., Zhou Y., Liu K. et al. Additive manufacturing by magnesium alloy AZ31 wire arc: grain grinding by adjusting pulse frequency. *Materials*, 2016, no. 9, pp. 823–824.
16. Knezovis N., Topis A. Additive production of wire and arc – new achievement in production. *Springer international publishing*, 2019, no. 36, p. 65–71.
17. Zhang H., Hu S., Wang Z., Liang Y. The effect of welding speed on the microstructures of the deposited coating of magnesium alloy AZ31 by cold metal transfer. *Materials Design*, 2015, no. 86, pp. 894–901.
18. Hu S., Zhang H., Wang Z. et al. Arc characteristics during cold metal transfer welding with magnesium alloy wire AZ31. *Journal Manufacturing process*, 2016, no. 24, pp. 298–306.
19. Vyasraj M., Gururaj P., Manoj G. Selective Laser Melting of Magnesium and Magnesium Alloy Powders: A Review. *Metals*, 2016, no. 51, pp. 1–35.
20. Vorndran E., Moseke C., Gbureck U. 3D printing of ceramic implants. *Materials Research Society Bulletin*, 2015, no. 40, pp. 127–136.
21. Meininger S., Moseke C., Spatz K. et al. Effect of strontium substitution on the material properties and osteogenic potential of 3D powder printed magnesium phosphate scaffolds. *Materials Science and Engineering*, 2019, no. 98, pp. 1145–1158.
22. Meininger S., Mandal S., Kumar A. et al. Strength reliability and in vitro degradation of three-dimensional powder printed strontium-substituted magnesium phosphate scaffolds. *Acta Biomaterialia*, 2016, no. 31, pp. 401–411.
23. Salehi M., Maleksaeedi S., Sapari M.A.B. et al. Additive manufacturing of magnesium–zinc–zirconium (ZK) alloys via capillary-mediated binderless three-dimensional printing. *Materials Desing*, 2019, no. 169, pp. 115–124.
24. Mukhina I.Yu., Mukhametov A.A.-Kh., Koshelev A.O. Elimination of surface casting defects on magnesium alloy castings by gas-dynamic spraying. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2018, no. 4, pp. 34–39.

#### Информация об авторах

**Уридия Зинаида Петровна**, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Токарев Максим Сергеевич**, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Леонов Александр Андреевич**, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Трофимов Николай Вадимович**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

#### Information about the authors

**Zinaida P. Uridiya**, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Maksim S. Tokarev**, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Alexander A. Leonov**, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Nikolay V. Trofimov**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 20.10.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 24.10.2022.  
The article was submitted 20.10.2022; approved and accepted for publication after reviewing 24.10.2022.