

УДК 621.793.71 : 620.197 : 669.721.5

А. В. ШОРИНОВ*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина*

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Представлены возможности применения технологии холодного газодинамического напыления для формирования защитных и восстановительных покрытий на деталях из магниевых сплавов. Выполнен анализ деталей авиационных двигателей производства АО «МОТОР СИЧ», изготавливаемых из магниевых сплавов, их дефектов, в частности, коррозии, причин возникновения и существующих способов защиты. Проанализированы работы по нанесению коррозионностойких покрытий холодным напылением, а также возможность применения данной технологии для ремонта и защиты деталей авиационной техники из магниевых сплавов от коррозии. В результате проведённой работы выделено перспективное направление применения технологии холодного напыления низкого давления для защиты и восстановления деталей из магниевых сплавов.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, магниевые сплавы, коррозия, защитные и восстановительные покрытия.

Введение

Использование магниевых сплавов в современной технике обуславливается, в первую очередь, благодаря низкой плотности, что позволяет существенно снизить вес изделий и конструкций. Наибольшими потребителями магниевых сплавов являются отрасли, в которых прочность и вес деталей имеют большое значение: автомобильная и авиационная промышленности. Уменьшение веса конструкции является одной из основных задач этих отраслей, так как с уменьшением веса снижаются выбросы парниковых газов, повышается топливная эффективность и производительность транспортного средства.

Несмотря на то, что использование магниевых сплавов в конструкциях автомобилей и авиационной технике прогнозировалось ещё в 70-х годах, их массовое применение началось во второй половине 90-х, после металлургических исследований и технологических разработок, необходимых для обеспечения промышленного производства. Кроме того, в результате конкуренции заметно повысились требования к снижению массы автомобиля и, связанного с этим, расхода топлива. Среди деталей из магниевых сплавов можно назвать диски колёс, картеры двигателя и коробки передач, корпуса масляных насосов, рулевое колесо, детали сидений, кронштейны, стойки и др. [1].

Одним из основных недостатков магниевых сплавов является низкая коррозионная стойкость.

Технология холодного газодинамического напыления является перспективным способом защиты, ремонта и восстановления деталей из магниевых сплавов.

Целью данной работы является показать возможности и перспективы применения технологии холодного газодинамического напыления низкого давления для формирования защитных и восстановительных покрытий на деталях из магниевых сплавов.

Постановка задачи

Магний и его сплавы обладают низким удельным весом, высокой прочностью, превосходной демфирующей способностью, хорошей текучестью для процесса литья, высоким эффектом экранирования электричества, хорошей теплопроводностью и низкой теплоёмкостью, не являются магнитными и токсичными. Данные свойства делают магний и его сплавы привлекательными для многих отраслей промышленности. В частности, в автомобильной и аэрокосмической сферах индустрии, для которых отношение прочности и веса является решающим параметром, магниевые сплавы рассматривались как многообещающая замена сплавов алюминия [2].

Однако широкое применение магния и магниевых сплавов ограничивается низкой коррозионной стойкостью из-за высокого электроотрицательного потенциала и недостаточных защитных свойств естественной окисной плёнки. Коррозией называются

ся процесс разрушения металлов вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с коррозионной средой [3].

В большинстве неорганических сред магниевые сплавы не обладают достаточной стойкостью, кроме хромовой кислоты и её солей, растворах фтористоводородной кислоты определённой концентрации, щелочных растворах, где сплавы устойчивы. Высокие скорости коррозии в нейтральных и кислых растворах объясняются низким электродным потенциалом и неустойчивостью оксидной плёнки. В щелочных растворах скорость коррозии резко падает вследствие повышения устойчивости защитной плёнки и одновременного уменьшения концентрации водородных ионов. Состав и структура сплава влияют на скорость коррозии, растущую с повышением температуры [4].

Коррозия магниевых сплавов в атмосферных условиях зависит от влажности воздуха, температуры, содержания в атмосфере газов и солей, от длительности пребывания плёнки влаги на поверхности и скорости её испарения. Наибольшая скорость коррозии отмечается в промышленных районах, наименьшая – в сельской местности. Приморские районы занимают промежуточное положение. Коррозионную стойкость магния высокой чистоты снижает подавляющее большинство металлических примесей и легирующих добавок, являющихся по отношению к магнию катодами. В средах, в которых процесс коррозии протекает с преимущественно водородной деполяризацией, сильное снижение коррозионной стойкости наблюдается под влиянием примесей с низким перенапряжением водорода: Fe, Ni, Co, Cu. Металлы с высоким перенапряжением водорода, например, Zn, Cd, Al, менее опасны. Каждая примесь имеет свой предел содержания, выше которого коррозионная стойкость магния резко падает. Все металлы в значительно меньшей степени снижают коррозионную стойкость магния в средах, в которых процесс протекает с преобладанием кислородной деполяризации, например, в атмосферных условиях [5, 6].

Поиск новых технологических решений для повышения коррозионной стойкости магниевых сплавов, формирование защитных покрытий, в настоящее время является актуальной задачей.

Необходимость в проведении исследований по напылению защитно-восстановительных покрытий на деталях из магниевых сплавов, подтверждается проведённым анализом деталей авиационных двигателей из магниевых сплавов производства АО «МОТОР СИЧ». В качестве примеров деталей из магниевого сплава МЛ15 можно назвать корпус промежуточный, корпус редуктора, корпус коробки приводов и др.

Также проведён анализ дефектов данных деталей и причин их возникновения. Наиболее распространёнными дефектами деталей из магниевых сплавов можно отметить дефекты литья (раковины, каверны, недолив металла), износ контактирующих поверхностей, механические повреждения при эксплуатации и ремонте, а также коррозия.

Анализ существующих способов защиты деталей из магниевых сплавов от коррозии

Защита магниевых сплавов от коррозии предусматривает комплекс мероприятий: металлургические (снижение металлических и неметаллических примесей, отсутствие флюсовых включений, добавление легирующих элементов) [7], нанесение неорганических плёнок и лакокрасочных покрытий [8, 9], органических покрытий [10], металлических покрытий [11, 12], выбор правильной конструктивной формы и сочетаний контактирующих материалов в изделиях [13].

Защита от коррозии неорганическими плёнками с лакокрасочными покрытиями обеспечивает надёжную эксплуатацию деталей и конструкций в атмосферных условиях. Неорганические плёнки без лакокрасочного покрытия не обеспечивают достаточной защиты деталей, длительно работающих в различных климатических условиях, но они повышают защитные свойства лакокрасочного покрытия и его адгезию к металлу. Кроме того, неорганические плёнки применяются для защиты деталей и полуфабрикатов в процессе производства и транспортировки. Лакокрасочное покрытие для магниевых сплавов состоит из грунтовочного пассивирующего и внешних эмалевых слоёв. Металлические покрытия (гальванические, металлизационные, плакирование) не находят широкого применения из-за недостаточной эффективности и сложности технологии. Иногда металлические покрытия применяются для повышения износостойкости и электро- и теплопроводности магниевых сплавов. Нанесение гальванических покрытий из-за окисной плёнки на поверхности магниевых сплавов и сильно электроотрицательного потенциала магния затруднено, поэтому поверхность перед нанесением таких покрытий обрабатывают в специальных растворах. Гальванические металлические покрытия, являясь катодными, обеспечивают защиту только при отсутствии пор, поэтому необходимо применять многослойные покрытия. Плакирование для защиты магниевых сплавов не нашло применения как в отечественной промышленности, так и за рубежом [14, 15].

Технология холодного газодинамического напыления

Технология холодного газодинамического напыления является относительно новой отраслью среди процессов газотермического напыления. Процесс холодного напыления основан на ускорении металлических частиц порошка сверхзвуковым газовым потоком в сопле Лавалья с последующим соударением о подложку и образованием покрытия. Процесс характеризуется тем, что материал порошка, используемый при напылении, не расплавляется [16], а, следовательно, уменьшается окисление покрытия, отсутствуют фазовые изменения материала и значительный нагрев подложки. При напылении другими газотермическими методами необходимо полное или частичное плавление порошкового материала.

Технология холодного напыления может быть разделена на 2 вида: холодное газодинамическое напыление высокого давления “ХГНВД”, при котором используются гелий или азот в качестве рабочего газа с давлением 2,5...5,0 МПа, и холодное газодинамическое напыление низкого давления “ХГННД” с использованием воздуха с давлением 0,5...1,0 МПа [17] (рис. 1).

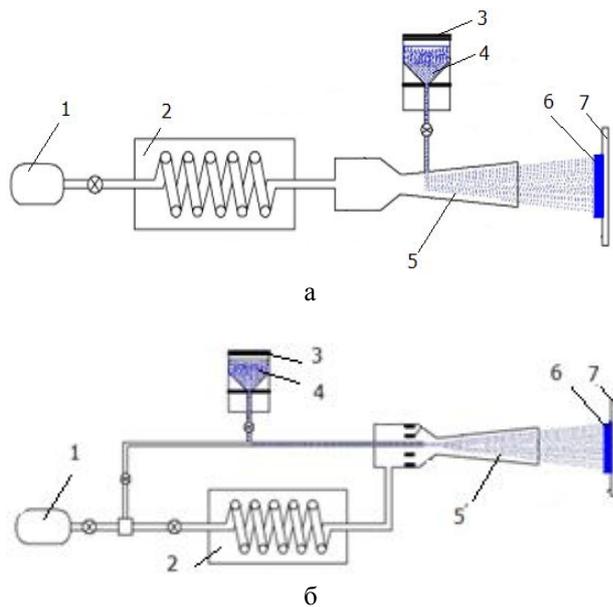


Рис. 1. Схематическое изображение процесса холодного напыления:
а – низкого давления; б – высокого давления;
1 – источник сжатого воздуха; 2 – нагреватель воздуха; 3 – порошковый питатель; 4 – порошок;
5 – сопло Лавалья; 6 – покрытие; 7 – подложка

Основное применение холодного газодинамического напыления низкого давления в аэрокосмической

промышленности – это ремонт и техническое обслуживание. При использовании холодного газодинамического напыления высокого давления могут быть напылены титановые сплавы и керамики.

Применение холодного напыления для защиты и восстановления деталей от коррозии

В настоящее время интерес к применению холодного напыления для защиты поверхностей деталей от коррозии стремительно развивается. Большинство исследований в этой области сконцентрированы на катодной коррозионной защите материалов, например, покрытия из алюминия [18-20], порошковых смесей алюминия и частиц Al_2O_3 [21-23], цинка [24], алюминия с добавлением магния [25], а также медных покрытий [26].

В работе [27] было получено алюминиевое покрытие с плотной структурой на магниевой подложке, которое показало удовлетворительную коррозионную защиту в растворе NaCl. Кроме того, наличие керамических частиц в покрытии алюминия улучшило его коррозионные свойства [22]. Алюминиевое покрытие, полученное холодным напылением низкого давления на алюминиевой подложке из сплава А2024, продемонстрировало хорошие антикоррозионные свойства в обычных атмосферных и морских [20]. В работе [25] отмечается плотная структура и хорошие коррозионные свойства алюминиевых покрытий Al+5%Mg на подложке из алюминиевого сплава.

В настоящее время интерес к применению технологии холодного газодинамического напыления для защиты и восстановления деталей авиационной техники значительно увеличился [28]. Большое количество магниевых деталей вертолётов склонны к появлению коррозии в местах контакта с деталями, изготовленных из других металлов, образующих гальваническую пару [29]. Более того, магниевые сплавы также подвержены к поверхностным повреждениям вследствие удара, что часто возникает при производстве, ремонте и обслуживании авиационной техники. Царапины и повреждения могут привести к появлению местной коррозии.

Министерство обороны США и аэрокосмическая промышленность на протяжении последних двадцати лет провели много работ по разработке специальной технологии обработки поверхности для предотвращения возникновения коррозии, повышения твердости поверхности, а также восстановления повреждённых участков [30].

Научно-исследовательская лаборатория армии США положила начало использования технологии холодного напыления в таких целях [31-33]. Проект

был направлен для восстановления и продления ресурса повреждённых поверхностей магниевых деталей вследствие коррозии. Достигнутые результаты послужили значительным толчком развития технологии холодного напыления не только в аэрокосмической отрасли, но и в других отраслях промышленности.

Корпуса редукторов вертолётов в основном изготавливают из магниевых сплавов, благодаря их уникальному сочетанию жёсткости и демпфирующей способности, низкой плотности, теплопроводности, а также хорошей обрабатываемости. Но в связи с тем, что магниевые сплавы являются наиболее электрохимически активными конструктивными металлами, они склонны к гальванической коррозии. На рис. 2 изображены места коррозионных повреждений редуктора хвостового винта вертолёта Н-53 [33].



Рис. 2. Коррозия корпуса редуктора хвостового винта вертолёта Н-53

Для улучшения коррозионной стойкости магниевых сплавов обычно используются следующие методы: твёрдое анодирование, хроматные и фосфатные покрытия, а также эпоксидная покраска. Но вместе с тем, выше представленные методы представляют серьёзную угрозу здоровью и окружающей среде. Кроме того, магниевые сплавы продолжают корродировать в эксплуатации даже после поверхностной обработки. При значительных коррозионных повреждениях корпуса редуктора требуется его полная замена, что влечёт за собой большие затраты и снижение эксплуатационной готовности.

Холодное напыление покрытий из порошка чистого алюминия и/или алюминиевого сплава (А6061) было рассмотрено как альтернативная замена существующих методов для защиты от коррозии. Известно, что добавление алюминия к магнию способствует образованию пассивной плёнки на поверхности. Таким образом, холодное напыление алюминиевого покрытия на детали из магниевых сплавов представляет собой метод, препятствующий

возникновению коррозии во влажной среде. Защитные свойства таких покрытий были исследованы многими учёными.

Примеры использования технологии холодного напыления алюминиевых покрытий для ремонта и защиты от коррозии корпуса редуктора УН-60 представлены на рис. 3 и 4 [34].



Рис. 3. Фото участков корпуса главного редуктора вертолёта УН-60 до и после восстановления



Рис. 4. Восстановленный холодным напылением алюминиевого покрытия корпус редуктора вертолёта из магниевых сплавов

Выводы

Технология ХГН является перспективным методом для получения защитных и восстановительных покрытий. Выполнен анализ деталей авиационных двигателей, изготавливаемых из магниевых сплавов, их коррозии, причин возникновения и существующих способов защиты. Проанализированы работы по нанесению коррозионностойких покрытий холодным напылением, а также возможность применения технологии для ремонта и защиты деталей авиационной техники из магниевых сплавов от коррозии.

Предыдущие работы в области холодного напыления антикоррозионных покрытий были направлены в основном на достижения максимальной плотности покрытий, так как отсутствие сквозной пористости обеспечивает надёжную защиту основного материала. Покрытия с минимальной пористостью были получены на установках холод-

ного напыления высокого давления с правильным выбором параметров напыления, размера и формы частиц, с добавлением керамических частиц к порошковой смеси, а также термообработкой полученных покрытий. Тем не менее, остаётся открытым вопрос о возможности использования холодного напыления низкого давления для нанесения защитных и восстановительных покрытий на детали из магниевых сплавов.

Литература

1. Рохлин, Л. Конкурент алюминия [Текст] / Л. Рохлин // *Металлы Евразии*. – 2003. – № 2. – С. 40–42.
2. Гнеденков, А. С. Гетерогенность, электрохимические и защитные свойства покрытий, формируемых на магниевых сплавах методом ПЭО [Текст] : дис. ... канд. хим. наук : 02.00.04 : защита 25.12.14 / Гнеденков Андрей Сергеевич. – Владивосток, 2014. – 196 с.
3. ГОСТ 5272–68. Коррозия металлов. Термины [Текст]. – Взамен ГОСТ 5272–60 : введ. 01.01.69. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1968. – 12 с.
4. Song, G. L. *Corrosion Mechanisms of Magnesium Alloys* [Text] / G. L. Song, A. Atrens // *Advanced Engineering Materials*. – 1999. – № 1. – P. 11–33.
5. Тимонова, М. А. Защита от коррозии магниевых сплавов [Текст] / М. А. Тимонова. – М. : Металлургия, 1977. – 159 с.
6. Review of Recent Developments in the Field of Magnesium Corrosion [Text] / A. Atrens, G. L. Song, M. Liu, Z. Shi, F. Cao, M. S. Dargusch // *Advanced Engineering Materials*. – 2015. – Vol. 17, № 4. – P. 400–453.
7. Reducing the corrosion rate of magnesium via microalloying additions of group 14 and 15 elements [Text] / R. L. Liu, J. R. Scully, G. Williams, N. Birbilis // *Article in Electrochimica Acta*. – 2018. – Vol. 260. – P. 184–195.
8. Research on Corrosion Resistance of AZ91D Magnesium Alloy Coated with Epoxy Resin, Advanced Conversion Coatings for Magnesium alloys [Text] / Y. Han, F. Pan, J. Tang, C. Zhou // *Materials Science Forum*. – 2011. – Vol. 686. – P. 292–299.
9. Phuong, N. V. Deposition and characterization of E-paint on magnesium alloy [Text] / N. V. Phuong, S. Moon // *Progress in Organic Coatings*. – 2015. – Vol. 89. – P. 91–99.
10. Recent progress in corrosion protection of magnesium alloys by organic coatings [Text] / R. G. Hu, S. Zhang, J. F. Bu, C. J. Lin, G. L. Song // *Progress in Organic Coatings*. – 2012. – Vol. 73, № 2. – P. 129–141.
11. Shaha, S. K. Influence of Cold Spray on the Enhancement of Corrosion Fatigue of the AZ31B Cast Mg Alloy [Text] / S. K. Shaha, S. B. Dayani, H. Jahed // *TMS Annual Meeting & Exhibition*. – 2018. – P. 541–550.
12. Wear and Corrosion Properties of 316L-SiC Composite Coating Deposited by Cold Spray on Magnesium Alloy [Text] / J. Chen, M. Bing, L. Guangu, S. Hui, W. Jinming, C. Lang, Z. Ziyun // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2017. – Vol. 26, № 6. – P. 1381–1392.
13. Jia, J. X. Influence of geometry on galvanic corrosion of AZ91D coupled to steel [Text] / J. X. Jia, G. Song, A. Atrens Ziyun // *Corrosion Science*. – 2017. – Vol. 48, №8. – P. 2133–2153.
14. Song, G. L. Corrosion prevention of magnesium alloys steel [Text] / G. L. Song. – Elsevier, 2011. – 656 p.
15. Song, G. L. Corrosion behavior and prevention strategies for magnesium (Mg) alloys steel [Text] / G. L. Song // *Corrosion Prevention of Magnesium Alloys*. – 2013. – №1. – P. 3–37.
16. Papyrin, A. Cold Spray Technology [Text] / A. Papyrin // *Advanced Materials & Processes*. – September 2001. – P. 49–51.
17. Davis, R. *Handbook of Thermal Spray Technology* [Text] / R. Davis – ASM International and the Thermal Spray Society, 2004. – 332 p.
18. Corrosion characteristics of cold gas spray coatings of reinforced aluminum deposited onto carbon steel [Text] / F. S. da Silva, J. Bedoya, S. Dosta, N. Cinca, I. G. Cano, J. M. Guilemany, A. V. Benedetti // *Corrosion Science*. – 2017. – Vol. 144. – P. 57–71.
19. Saltwater corrosion behavior of cold sprayed AA7075 aluminum alloy coatings [Text] / S. Ngai, T. Ngai, F. Vogel, W. Story, G. B. Thompson, L. N. Brewer // *Corrosion Science*. – 2018. – Vol. 130. – P. 231–240.
20. Effect of cold sprayed Al coating on mechanical property and corrosion behavior of friction stir welded AA2024-T351 joint [Text] / W. Y. Li, R. R. Jiang, C. J. Huang, Z. H. Zhang, Y. Feng // *Materials & Design*. – 2015. – Vol. 65. – P. 757–761.
21. Effects of ceramic particle size on microstructure and the corrosion behavior of cold sprayed SiCp/Al 5056 composite coatings [Text] / Y. Wang, B. Normand, N. Mary, M. Yu, H. Liao // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 315. – P. 314–325.
22. Corrosion performance of Al–Al₂O₃ cold sprayed coatings on mild carbon steel pipe under thermal insulation [Text] / X. Bai, J. Tang, J. Gong, X. Lü // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. – 2017. – Vol. 25, № 4. – P. 533–539.
23. Cold-Sprayed Metal Matrix Composite Coatings [Text] / Y. T. Lee, T. Hussain, G. A. Fisher, A. G. McDonald // *Cold-Spray Coatings*. – 2017. – P. 275–295.
24. The corrosion behavior of cold sprayed zinc coatings on mild steel substrate [Text] / N. M. Chavan, B. Kiran, A. Jyothirmayi, P. P. Sudharshan, G. Sundararajan // *Journal Thermal Spray Technology*. – 2013. – № 22 (4). – P. 463–470.

25. DeForce, B. S. *Cold spray Al-5%Mg coatings for the corrosion protection of magnesium alloys [Text]* / B. S. DeForce, T. J. Eden, J. K. Potter // *Journal Thermal Spray Technology*. – 2011. – № 20 (6). – P. 1352–1358.

26. *Corrosion of cold spray deposited copper coating on steel substrates [Text]* / R. Partovi-Nia, S. Ramamurthy, D. Zagidulin, J. Chen, R. Jacklin, P. Keech, D. W. Shoesmith // *Corrosion*. – 2015. – Vol. 71, № 10. – P. 1237–1247.

27. Diab, M. *The effect of pure aluminum cold spray coating on corrosion and corrosion fatigue of magnesium (3%Al-1%Zn) extrusion [Text]* / M. Diab, X. Pang, H. Jahed // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 309. – P. 423–435.

28. Champagne, V. K. *Mainstreaming cold spray–push for applications [Text]* / V. K. Champagne, D. J. Helfritsch // *Surface Engineering*. – 2014. – Vol. 30, № 6. – P. 396–403.

29. *A systematic approach to material eligibility for the cold spray process [Text]* / J. Vlcek, L. Gimeno, H. Huber, E. Lugscheider // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2005. – № 14 (3). – P. 125–133.

30. Champagne, V. K. *Magnesium Repair by Cold Spray [Text]* / V. K. Champagne, P. F. Leyman, D. J. Helfritsch // *ARL Technical Report ARL-TR-4438*, 2008. – 34 p.

31. Champagne, V. K. *The repair of magnesium rotorcraft components by cold spray [Text]* / V. K. Champagne // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. – 2008. – № 8 (2). – P. 164–175.

32. Hoiland, B. *Application of high-pressure cold spray for an internal bore repair of a navy valve actuator [Text]* / B. Hoiland, T. E. Stamey, V. K. Champagne // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2016. – Vol. 25, № 1. – P. 193–201.

33. *Cold Spray Applications. Chapter 2 [Text]* / V. K. Champagne, C. A. Widener and etc. // *Cold-Spray Coatings*. – 2018. – P. 25–56.

34. Champagne, V. K. *Cold spray technology for DOD applications [Text]* / V. K. Champagne, B. Barnett // *ASETS defense 2012 : Workshop on sustainable surface engineering for aerospace and defense, San Diego, CA, Aug 27–30, 2012*. – 34 p.

References

1. Rokhlin, L. *Konkurent alyuminiya [Aluminium rival]*. Metally Evrazii, 2003, no. 2, pp. 40–42.

2. Papyrin, A. *Cold Spray Technology. Advanced Materials & Processes*, September 2001, pp. 49–51.

3. Davis, R. *Handbook of Thermal Spray Technology. ASM International and the Thermal Spray Society*, 2004, 332 p.

4. Gnedenkov, A. S. *Geterogenost', elektrokhimicheskie i zashchitnye svoystva pokrytiy, formiruemykh na magnievykh splavakh metodom PEO*. Diss. kand. khim. nauk [Inhomogeneity, electrochemical protective properties of the plasma-electrolytic oxidation coatings

onto Magnesium alloys. Dys. ... cand. chem. sci.]. Vladivostok, 2014. 196 p.

5. GOST 5272–68. *Korroziya metallov. Terminy [State Standard 5272–68. Corrosion of metals. The terms]*. Moscow, Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam Publ., 1968, 12 p.

6. Song, G. L., Atrens, A. *Corrosion Mechanisms of Magnesium Alloys. Advanced Engineering Materials*, 1999, no. 1, pp. 11–33.

7. Timonova, M. A. *Zashchita ot korrozii magnievykh splavov [Corrosion prevention of Magnesium alloys]*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 159 p.

8. Atrens, A., Song, G. L., Liu, M., Shi, Z., Cao, F., Dargusch, M. S. *Review of Recent Developments in the Field of Magnesium Corrosion. Advanced Engineering Materials*, 2015, vol. 17, no. 4, pp. 400–453.

9. Liu, R. L., Scully, J. R., Williams, G., Birbilis, N. *Reducing the corrosion rate of magnesium via microalloying additions of group 14 and 15 elements. Article in Electrochimica Acta*, 2018, vol. 260, pp. 184–195.

10. Han, Y., Pan, F., Tang, J., Zhou, C. *Research on Corrosion Resistance of AZ91D Magnesium Alloy Coated with Epoxy Resin. Advanced Conversion Coatings for Magnesium alloys. Materials Science Forum*, 2011, vol. 686, pp. 292–299.

11. Phuong, N. V., Moon, S. *Deposition and characterization of E-paint on magnesium alloy. Progress in Organic Coatings*, 2015, vol. 89, pp. 91–99.

12. Hu, R. G., Zhang, S., Bu, J. F., Lin, C. J., Song, G. L. *Recent progress in corrosion protection of magnesium alloys by organic coatings. Progress in Organic Coatings*, 2012, vol. 73, no. 2, pp. 129–141.

13. Shaha, S. K., Dayani S. B., Jahed, H. *Influence of Cold Spray on the Enhancement of Corrosion Fatigue of the AZ31B Cast Mg Alloy. TMS Annual Meeting & Exhibition*, 2018, pp. 541–550.

14. Chen, J., Bing, M., Guangu, L., Hui, S., Jinming, W., Lang, C., Ziyun, Z. *Wear and Corrosion Properties of 316L-SiC Composite Coating Deposited by Cold Spray on Magnesium Alloy. Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, vol. 26, no. 6, pp. 1381–1392.

15. Jia, J., Song, X. G., Atrens, A. *Influence of geometry on galvanic corrosion of AZ91D coupled to steel. Corrosion Science*, 2017, vol. 48, no. 8, pp. 2133–2153.

16. Song, G. L. *Corrosion prevention of magnesium alloys steel. Elsevier*, 2011, 656 p.

17. Song, G. L. *Corrosion behavior and prevention strategies for magnesium (Mg) alloys steel. Corrosion Prevention of Magnesium Alloys*, 2013, no. 1, pp. 3–37.

18. Da Silva, F. S., Bedoya, J., Dosta, S., Cinca, N., Cano, I. G., Guilemany, J. M., Benedetti, A. V. *Corrosion characteristics of cold gas spray coatings of reinforced aluminum deposited onto carbon steel. Corrosion Science*, 2017, vol. 144, pp. 57–71.

19. Ngai, S., Ngai, T., Vogel, F., Story, W., Thompson, G. B., Brewer, L. N. *Saltwater corrosion*

behavior of cold sprayed AA7075 aluminum alloy coatings. *Corrosion Science*, 2018, vol. 130, pp. 231-240.

20. Li, W. Y., Jiang, R. R., Huang, C. J., Zhang, Z. H., Feng, Y. Effect of cold sprayed Al coating on mechanical property and corrosion behavior of friction stir welded AA2024-T351 joint. *Materials & Design*, 2015, vol. 65, pp. 757-761.

21. Wang, Y., Normand, B., Mary, N., Yu, M., Liao, H. Effects of ceramic particle size on microstructure and the corrosion behavior of cold sprayed SiCp/Al5056 composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 315, pp. 314-325.

22. Bai, X., Tang, J., Gong, J., Lü, X. Corrosion performance of Al-Al₂O₃ cold sprayed coatings on mild carbon steel pipe under thermal insulation. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2017, vol. 25, no. 4, pp. 533-539.

23. Lee, Y. T., Hussain, T., Fisher, G. A., McDonald, A. G. Cold-Sprayed Metal Matrix Composite Coatings. *Cold-Spray Coatings*, 2017, pp. 275-295.

24. Chavan, N. M., Kiran, B., Jyothirmayi, A., Sudharshan, P. P., Sundararajan, G. The corrosion behavior of cold sprayed zinc coatings on mild steel substrate. *Journal Thermal Spray Technology*, 2013, vol. 22, no. 4, pp. 463-470.

25. DeForce, B. S., Eden, T. J., Potter, J. K. Cold spray Al-5%Mg coatings for the corrosion protection of magnesium alloys. *Journal Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 20, no. 6, pp. 1352-1358.

26. Partovi-Nia, R., Ramamurthy, S., Zagidulin, D., Chen, J., Jacklin, R., Keech, P., Shoesmith, D. W. Corrosion of cold spray deposited copper coating on

steel substrates. *Corrosion*, 2015, vol. 71, no. 10, pp. 1237-1247.

27. Diab, M., Pang, X., Jahed, H. The effect of pure aluminum cold spray coating on corrosion and corrosion fatigue of magnesium (3%Al-1%Zn) extrusion. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 309, pp. 423-435.

28. Champagne, V. K., Helfritch, D. J. Mainstreaming cold spray-push for applications. *Surface Engineering*, 2014, vol. 30, no. 6, pp. 396-403.

29. Vlcek, J., Gimeno, L., Huber, H., Lugscheider, E. A systematic approach to material eligibility for the cold spray process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2005, vol. 14, no. 3, pp. 125-133.

30. Champagne, V. K., Leyman, P. F., Helfritch, D. J. Magnesium Repair by Cold Spray. *ARL Technical Report ARL-TR-4438*, 2008, 34 p.

31. Champagne, V. K. The repair of magnesium rotorcraft components by cold spray. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2008, vol. 8, no. 2, pp. 164-175.

32. Hoiland, B., Stamey, T. E., Champagne, V. K. Application of high-pressure cold spray for an internal bore repair of a navy valve actuator. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2016, vol. 25, no. 1, pp. 193-201.

33. Champagne, V. K., Widener, C. A. and etc. Cold Spray Applications. Chapter 2. *Cold-Spray Coatings*, 2018, pp. 25-56.

34. Champagne, V. K., Barnett, B. Cold spray technology for DOD applications. *ASETS defense 2012: Workshop on sustainable surface engineering for aerospace and defense*, San Diego, CA, Aug 27-30, 2012, 34 p.

Поступила в редакцию 15.01.2018, рассмотрена на редколлегии 4.04.2018

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЮВАННЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ ТА ВІДБУДУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ З МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ

О. В. Шорінов

Представлено можливості застосування холодного газодинамічного напилювання для формування захисних та відбудовних покриттів на деталях з магнієвих сплавів. Сплави з магнію завдяки поєднанню низької щільності з високими механічними властивостями матеріалу знайшли застосування в авіаційній та автомобільній галузях. Застосування таких сплавів дозволяє зменшити вагу деталей та вузлів авіаційної техніки, а разом з тим зменшити витрату палива та викиди шкідливих речовин в навколишнє середовище. Однак основним недоліком магнієвих сплавів є низькі корозійні властивості, що стримує їх широке застосування в техніці. Крім того, магнієві сплави дуже вразливі до поверхневих дефектів, що виникають в процесі виготовлення деталей та їх експлуатації. В роботі виконано аналіз деталей авіаційних двигунів виробництва АТ «МОТОР СІС» з магнієвих сплавів, їх дефектів, зокрема, корозії, причин виникнення та існуючих способів захисту. Найбільш поширеними місцями виникнення корозії магнієвих сплавів є місця контакту з іншими металами, наприклад, фланцеві з'єднання. Для підвищення корозійної стійкості магнієвих сплавів зазвичай застосовуються тверде анодування, хроматні та фосфатні покриття, а також епоксидне фарбування. Але ці методи представляють серйозну загрозу здоров'ю та довкіллю. Більш того, корозія магнієвих сплавів спостерігається навіть після поверхневої обробки. При значних корозійних ураженнях деталі потрібна її повна заміна, що знижує експлуатаційну готовність та збільшує затрати. Пропонується застосування технології холодного газодинамічного напилювання для формування захисних та відбудовних покриттів на деталях з магнієвих сплавів. Проаналізовано роботи з нанесення корозійностійких покриттів холодним напилюванням, а також можливість застосування даної технології для ремонту та захисту деталей з магнієвих сплавів від корозії. В результаті проведеної роботи відзначено перспективний напрямок застосування холодного

напилювання низького тиску для захисту та відбудування деталей з магнієвих сплавів, що значно розширить можливості застосування цих сплавів у різних галузях промисловості.

Ключеві слова: холодне газодинамічне напилювання, магнієві сплави, корозія, захисні та відбудовні покриття.

POTENTIAL APPLICATION OF COLD GAS-DYNAMIC SPRAYING OF PROTECTIVE AND RESTORATIVE COATINGS ONTO MAGNESIUM PARTS

O. Shorinov

Magnesium alloys are widely used in modern technology, especially in the aviation and automotive industries, primarily due to low density, which allows reducing the weight of products and structures significantly. However, one of the main disadvantages of magnesium alloys is low corrosion resistance, which limits the possibilities of their wide application. A large number of magnesium parts of helicopters are prone to corrosion in places of contact with parts made of other metals forming a galvanic couple. Moreover, magnesium alloys are also susceptible to surface damage due to impact, which often occurs in the manufacture, repair and maintenance of aviation equipment. Scratches and damage can lead to local corrosion. It is shown that energy- and resource-saving cold spraying technology is effective and advanced technology for repairing and recovering of magnesium parts against corrosion. The cold gas-dynamic spraying technology is a relatively new industry among the processes of thermal spraying. The cold spray process is based on accelerating the metal powder particles with a supersonic gas stream in the Laval nozzle followed by an impact on the substrate and the formation of a coating. The process is characterized in that the powder material used in the spraying process does not melt and therefore the oxidation of the coating decreases; there are no phase changes in the material and no considerable heating of the substrate. The results of the analysis of the current state of cold spraying of protective and restorative coatings as well as the analysis of the aviation engines magnesium parts manufactured by «MOTOR SICH», their damages, in particular corrosion, causes of occurrence and current protection methods are accomplished. The works aimed to deposition of cold spray corrosion-resistant coatings and its application for restoration and protection of magnesium parts against corrosion are analyzed. The previous work in the field of cold spraying of anticorrosive coatings was mainly aimed to achieving maximum density of coatings, since the absence of through porosity provides reliable protection of the base material. Coatings with a minimum porosity were obtained using the high-pressure cold spray systems. The analysis showed that the issue of using low-pressure cold-spray equipment remains open and confirms the urgency of further research.

Keywords: cold spraying, magnesium alloys, corrosion, protective and restorative coatings.

Шоринов Александр Владимирович – мл. науч. сотр. каф. технологии производства авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: shorinov1@gmail.com.

Shorinov Oleksandr Volodymyrovych – junior researcher of Dept. of aircraft engine manufacturing technologies, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkov, Ukraine, e-mail: shorinov1@gmail.com.