

УДК 539.3 : 543.1

Шоринов А. В. м. н. с. кафедры Технологий производства авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: shorinov1@gmail.com;

Маркович С. Е. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры Технологий производства авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: motor.khai@gmail.com

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ ХОЛОДНЫМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ

Цель работы. Демонстрация возможностей технологии холодного газодинамического напыления низкого давления для ремонта и восстановления корпусных деталей авиационной техники из легких сплавов.

Методы исследования. Напыление защитно-восстановительных покрытий на основе алюминия на корпусные детали авиационной техники из магниевых и алюминиевых сплавов выполнено с использованием установки холодного газодинамического напыления низкого давления ДИМЕТ-405. Обеспечение заданного комплекса физико-механических свойств покрытий, а именно адгезионной прочности, микротвердости, микроструктуры, осуществляется с использованием корреляционной карты влияния технологических режимов на свойства покрытий.

Полученные результаты. Развитие ремонтного производства в направлении создания технологий напыления защитных и восстановительных покрытий является актуальной задачей в настоящее время. Представлены возможности применения технологии холодного газодинамического напыления низкого давления для восстановления корпусных деталей авиационной техники на примере корпуса коробки приводов из магниевого сплава, корпуса насоса и корпуса дозатора из алюминиевых сплавов. В случае с корпусом из магниевого сплава кроме восстановления поврежденных участков фланца, также обеспечивается коррозионная защита. Энерго- и ресурсосберегающая технология холодного газодинамического напыления предусматривает использование недорогого мобильного технологического оборудования для нанесения покрытий как в условиях производства, так и в «полевых» условиях. Этапами технологического процесса восстановления являются: подготовка поверхности с повреждением к напылению путем обдувки песком, разделки дефектов для придания формы предотвращающей образованию пустот, обезжиривания, непосредственно напыление с последующей механической обработкой для получения заданной геометрии и качества поверхности. Полученные результаты расширяют возможности использования технологии холодного газодинамического напыления защитных и восстановительных покрытий как в автомобиле-, так и в авиадвигателестроении.

Научная новизна. Разработан новый подход к проектированию технологических процессов формирования восстановительных покрытий на корпусных деталях из легких сплавов (магниевого и алюминиевого сплавы) на основе выбора технологических режимов напыления с применением корреляционной карты, которую можно использовать для анализа влияния параметров процесса на свойства покрытий.

Практическая ценность. Технология холодного газодинамического напыления может быть широко использована в ремонтном производстве для формирования защитных и восстановительных покрытий. Разработаны технологические рекомендации и отработан технологический процесс восстановления корпусных деталей из легких сплавов холодным газодинамическим напылением.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление; технологический процесс восстановления; защитные и восстановительные покрытия.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из самых сложных с точки зрения предъявляемых технических, эксплуатационных и экономических требований является аэрокосмическая техника. В технологии авиационной техники повышенное внимание уделено изготовлению корпусных деталей агрегатов авиационной техники. Данные изделия должны обеспечивать высокое

качество, долговечность, а также экономическую целесообразность. Особую значимость играет правильность выбора материала деталей. Зачастую используют магний, титан и алюминий, а также сплавы на их основе, обладающие широким диапазоном свойств, соответствующих требованиям к авиационным материалам. К ним относятся:

механическая прочность и высокий предел выносливости в сочетании с малой плотностью.

Однако в процессе эксплуатации под воздействием статических и динамических нагрузок, переменных температур, вследствие конструктивных и производственных дефектов, а также при влиянии вибраций, пыли, различных газов и сред или возможных нарушений условий технического обслуживания, детали и компоненты подвергаются быстрому износу, что приводит к дальнейшему разрушению или выходу из строя целого агрегата [1]. К поверхностным дефектам относятся искажения формы и размеров поверхностей, нарушение поверхностного слоя (налет, коррозии, забоины, риски, наклеп, следы схватывания, отклонения от округлости и цилиндричности, эрозия и др.). Разрушение поверхностных слоев проявляется в постепенном изменении размеров и формы рабочих поверхностей — основная причина поступления деталей авиационной техники в ремонт.

В настоящее время поиск и разработка новых способов восстановления и защиты поверхностей деталей являются актуальной задачей. Перспективным методом для ремонта и восстановления деталей является технология холодного газодинамического напыления [2, 3]. Данная технология нанесения покрытий расширяет возможности ремонта и увеличивает ресурс авиационной техники, а также позволяет формировать покрытия с наперед заданными свойствам.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы является демонстрация возможностей технологии ХГН для ремонта и восстановления корпусных деталей из легких сплавов. Для достижения поставленной цели необходимо на примере корпусов из магниевых и алюминиевых сплавов с типовыми и наиболее распространенными поверхностными дефектами корпусных деталей авиационной техники отработать технологию восстановления поверхностей (подготовка поверхности к напылению, напыление покрытия, обработка полученного покрытия).

2 ТЕХНОЛОГИЯ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Холодное газодинамическое напыление (ХГН) — это процесс формирования металлических покрытий при соударении холодных (с температурой, существенно меньшей температуры плавления) металлических частиц, ускоренных сверхзвуковым газовым потоком до скорости несколько сот метров в секунду, с поверхностью обрабатываемой детали. Сущность метода состоит в том, что предварительно сформированную газопорошковую смесь с частицами размером 550 мкм ускоряют в сверхзвуковом потоке воздуха или иного газа (гелий, азот), с температурой существенно

меньшей температуры плавления материала частиц ($T_0 = 0,4-0,7T_{рт}$), и направляют на напыляемую поверхность [4, 5]. В результате ударного взаимодействия частиц с преградой на последней формируется покрытие из пластически деформированных частиц напыляемого порошка. Основным физическим механизмом ХГН является высокоскоростная деформация напыляемых частиц при ударе, приводящая к интенсивным сдвиговым течениям материала по границам контакта, и образованию адгезионно-когезионных связей [6]. Из этого следует, что физические особенности ХГН позволяют существенно расширить возможности методов нанесения покрытий порошковыми материалами и обуславливают разработку широкого круга технологий по нанесению покрытий различного функционального назначения: электропроводящих (электротехнические изделия), упрочняющих, коррозионноустойчивых, температуро- и жаростойких [7].

Схематическое изображение процесса холодного газодинамического напыления низкого давления представлено на рисунке 1.

Основной особенностью ХГН является отсутствие высоких температур в процессе формирования металлических покрытий, следовательно, отсутствие окисления материалов частиц и основания процессов не равновесной кристаллизации, высоких внутренних напряжений в обрабатываемых деталях [8].

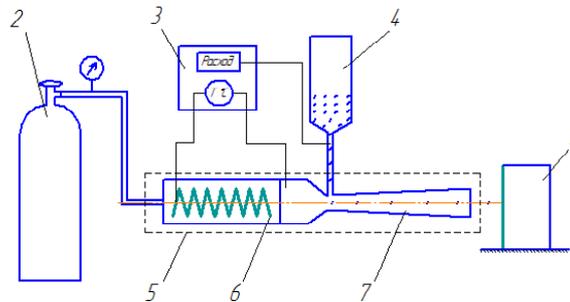


Рисунок 1. Схематическое изображение процесса ХГН: 1 — обрабатываемая деталь; 2 — источник сжатого воздуха; 3 — блок управления; 4 — порошковый дозатор; 5 — устройство для напыления; 6 — электрический нагреватель; 7 — сопло Лавала

3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Технологический процесс (ТП) восстановления деталей — это процесс, содержащий целенаправленные действия по изменению определенного состояния детали с целью восстановления ее эксплуатационных свойств.

Технологическая схема нанесения покрытий ХГН представлена на рисунке 2 и состоит из следующих основных операций: контроль и подготовка порошка, контроль и подготовка поверх-

ности, наладка оборудования, нанесение покрытий, дополнительная обработка покрытий, контроль напыленного изделия [9].

В работе [9] был разработан типовой технологический процесс восстановления и защиты корпусных деталей АТ на примере корпуса из магниевого сплава. ТП включает в себя устранение методом ХГН поврежденных поверхностей коррозией, а также других дефектов, а именно износы рабочих поверхностей, царапины, задиры, сколы, риски и т. п.

В процессе ремонта деталей были отработаны режимы нанесения восстановительных покрытий ХГН, а также операции обработки полученных покрытий.

На рисунке 3 представлено схематическое изображение этапов процесса восстановления поверхностей в результате коррозии и механического повреждения.

На рисунке 4 представлены фотографии корпусных деталей с дефектами до и после восстановления холодным газодинамическим напылением: корпус коробки агрегатов из магниевого сплава со следами значительного коррозионного разрушения фланца (рис. 4а); корпус насоса из алюминиевого сплава со следами механического повреждения (рис. 4б); корпус дозатора из алюминиевого сплава с резом фрезой (рис. 4д).

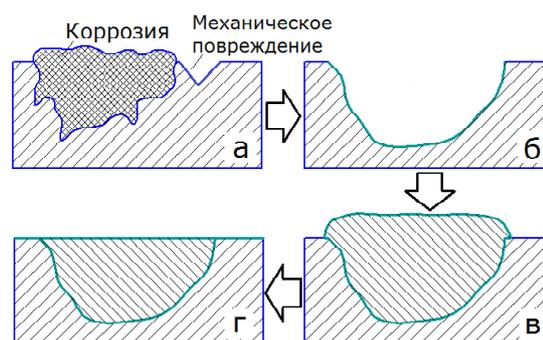


Рисунок 3. Схематическое изменение восстанавливаемых поверхностей: а – поверхность с дефектом; б – подготовка к напылению; в – напыление покрытия; г – поверхность после механической обработки

После удаления продуктов коррозии, смазки и других следов эксплуатации, проводится визуальный контроль.

Следующий этап – это придание поверхностному дефекту формы, предотвращающей образование внутренних пустот при напылении. Подготовка поверхности проводилась механической обработкой путем разделки дефектов.

Следующий этап ТП – непосредственно напыление покрытия. В качестве материала порошка был выбран порошковый материал на основе алюминия $Al+Zn+Al_2O_3$. Размер частиц порошка 18...22 мкм. Технологические рекомендации по напылению коррозионностойкого восстановительного алюминиевого покрытия на детали из магниевых и алюминиевых сплавов были подобраны с целью достижения максимальной плотности покрытий, что обеспечит надежную защиту основного металла от коррозии.

Напыление восстановительного покрытия выполнялось на установке холодного газодинамического напыления низкого давления ДИМЕТ-405 со следующими режимами:

- давление торможения 0,8 МПа;
- температурный режим №5;
- расход порошка 5 г/с;
- дистанция напыления 15 мм.

Выбор технологических режимов напыления основан на использовании корреляционной карты влияния параметров напыления на свойства покрытий [10].

Физико-механические свойства полученных покрытий удовлетворяют предъявляемым требованиям. Результаты исследований свойств покрытий в данной работе не представлены, поскольку выходят за рамки поставленных целей и задач.

Механическая обработка полученных покрытий включала в себя придание восстанавливаемым поверхностям корпусов необходимой формы, геометрии и шероховатости. Обработку покрытий выполняют шлифованием, фрезерованием, а также допускается обработка ручным гравером с использованием бор-фрез. При обработке в

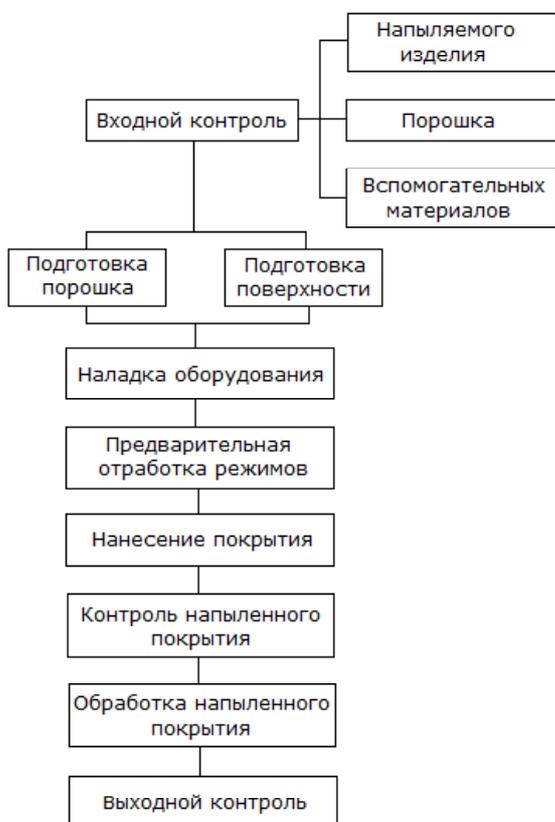


Рисунок 2. Технологическая схема напыления покрытий методом ХГН



Рисунок 4. Фотографии корпусов до и после восстановления

случае обнаружения в покрытии образовавшихся пустот, операции разделки данного дефекта с последующим напылением необходимо повторить.

ВЫВОДЫ

В работе представлены примеры восстановления корпусных деталей авиационной техники из магниевых и алюминиевых сплавов методом холодного газодинамического напыления низкого давления. Отработан технологический процесс напыления защитных и восстановительных покрытий на основе алюминия, обеспечивающий заданные физико-механические характеристики покрытий. Основными этапами процесса восстановления деталей являются: анализ поверхностного дефекта, подготовка поверхности для напыления, непосредственно процесс напыления покрытия и его последующая механическая обработка и контроль. В результате проделанной работы можно сделать вывод о больших перспективах технологии ХГН в развитии современного ремонтного производства и повышении ресурса

деталей и узлов авиационной и других отраслей промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Елисеев Ю. С. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателестроении / Ю.С. Елисеев, Н.В. Абрамов, В.В. Крымов – М. : Высшая школа, 1999. – 525 с.
- [2]. Champagne V. K. Mainstreaming cold spray – push for applications / V. K. Champagne, D. J. Helfritsch // Surface Engineering. – 2014. – Vol. 30, №6. – P. 396–403.
- [3]. Champagne V. K. Cold Spray Applications / V. K. Champagne, V. K. Champagne III C. Widener // Cold-Spray Coatings. – 2018. – P. 25–56.
- [4]. Papyrin A. Cold Spray Technology / A. Papyrin // Advanced Materials & Processes. – September 2001. – P. 49–51.
- [5]. Davis R. Handbook of Thermal Spray Technology [Text] / R. Davis – ASM International and the Thermal Spray Society, 2004. – 332 p.

- [6]. Bonding mechanism in cold gas spraying / Н. Assadi, F. Gärtner, T. Stoltenhoff, H. Kreye // Acta Materialia, – 2003. – Vol. 51, № 15. – P. 4379–4394.
- [7]. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика / под ред. В. М. Фомина – М. : Физматлит, 2010. – 545 с.
- [8]. Maev R. G. Low-Pressure Cold Spray (LPCS) / R. G. Maev, V. Leshchynsky // In: Cavaliere P. (eds) Cold-Spray Coatings. Springer, Cham, 2017. – P. 95–142.
- [9]. Шорин А. В. Разработка технологического процесса восстановления корпусных деталей авиационной техники холодным газодинамическим напылением / А. В. Шорин, С. Е. Маркович, А. И. Долматов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – № 9 (144). – С. 98–102.
- [10]. Canales H. Statistical Analysis of the effect of process parameters and coatings properties in the low pressure cold spraying process / Canales H., Markovych S., Dolmatov A. // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ : тези доп. Всеукр. науково-техн. конф. 14–19 вересня 2014 р. – Харків, 2014. – С. 103.

Статья поступила в редакцию 07.05.2018

Шорин О. В. м. н. с. кафедры технологий производства авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. М. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: shorinov1@gmail.com;

Маркович С. Е. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологий производства авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. М. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: motor.khai@gmail.com

ВІДНОВЛЕННЯ КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ З ЛЕГКИХ СПЛАВІВ ХОЛОДНИМ ГАЗОДИНАМІЧНИМ НАПИЛЮВАННЯМ

Мета роботи. Демонстрація можливостей технології холодного газодинамічного напилювання низького тиску для ремонту і відновлення корпусних деталей авіаційної техніки з легких сплавів.

Методи дослідження. Напилювання захисно-відновних покриттів на основі алюмінію на корпусні деталі авіаційної техніки з магнієвих і алюмінієвих сплавів виконано з використанням установки холодного газодинамічного напилювання низького тиску ДИМЕТ-405. Забезпечення заданого комплексу фізико-механічних властивостей покриттів, а саме адгезійної міцності, мікротвердості, мікроструктури, здійснюється з використанням кореляційної карти впливу технологічних режимів на властивості покриттів.

Отримані результати. На сьогодні розвиток ремонтного виробництва в напрямку створення технологій напилювання захисних та відновлювальних покриттів є актуальним завданням. Представлені можливості застосування технології холодного газодинамічного напилювання низького тиску для відновлення корпусних деталей авіаційної техніки на прикладі корпусу коробки приводів з магнієвого сплаву, корпусу насоса і корпусу дозатора з алюмінієвих сплавів. У випадку з корпусом з магнієвого сплаву крім відновлення пошкоджених ділянок фланцю від корозії, також забезпечується корозійний захист. Енерго- та ресурсозаощадлива технологія холодного газодинамічного напилювання передбачає використання недорогого мобільного технологічного обладнання для нанесення покриттів як в умовах виробництва, так і в «польових» умовах. Етапами технологічного процесу відновлення є: підготовка поверхні з пошкодженням до напилювання шляхом обдування піском, оброблення дефектів для забезпечення форми, що запобігає утворенню порожнин, знежирення, безпосередньо напилювання з наступною механічною обробкою для отримання заданої геометрії і якості поверхні. Отримані результати розширюють можливості використання технології холодного газодинамічного напилювання захисних та відновлювальних покриттів як в автомобіле-, так і в авіадвигунобудуванні.

Наукова новизна. Розроблено новий підхід до проектування технологічних процесів формування відновних покриттів на корпусних деталях з легких сплавів (магнієві і алюмінієві сплави) на основі вибору технологічних режимів напилювання із застосуванням кореляційної карти, яку можна використовувати для аналізу впливу параметрів процесу на властивості покриттів.

Практична цінність. Технологія холодного газодинамічного напилювання може широко застосовуватись в ремонтному виробництві для формування захисних і відновлювальних покриттів. Розроблено технологічні рекомендації та відпрацьований технологічний процес відновлення корпусних деталей з легких сплавів холодним газодинамічним напилюванням.

Ключові слова: холодне газодинамічне напилювання; технологічний процес відновлення; захисні та відновлювальні покриття.

Shorinov O. V. Junior researcher of Dept. of Aircraft Engine Manufacturing Technologies, Kharkiv National Aerospace University, Kharkiv, Ukraine, e-mail: shorinov1@gmail.com;

Markovych S. E. Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Aircraft Engine Manufacturing Technologies, Kharkiv National Aerospace University, Kharkiv, Ukraine, e-mail: motor.khai@gmail.com

RESTORATION PROCESS OF CASING PARTS MADE OF LIGHT ALLOYS USING COLD GAS-DYNAMIC SPRAYING

Purpose. Demonstration of the capabilities of a low-pressure cold gas-dynamic spraying technology for repair and restoration of aeronautical casing parts made of light alloys.

Methodology. Deposition of protective and restorative coatings based on aluminum on aeronautical casing parts made of light alloys such as magnesium and aluminum alloys was performed using the DYMET-405 low-pressure gas-dynamic spraying machine. Ensuring of the desired physical and mechanical properties of coatings such as adhesion strength, microhardness, microstructure is carried out using a correlation map of influence of technological modes on the properties of coatings.

Findings. Development of maintenance, repair, and overhaul processes (MRO) in the direction of creating technologies for the deposition of protective and restorative coatings is a crucial task to date. The possibilities of using low-pressure gas-dynamic spraying technology for restoration of aircraft casing parts are exemplified by the magnesium housing assembly, the aluminum pump and the dispenser housings. In case of the magnesium housing, in addition to restoring the damaged areas of the flange, corrosion protection is also provided. Energy- and resource-saving technology of cold gas-dynamic spraying provides utilization of low-cost portable technological equipment for coating application both in production and in "field" conditions. The restoration process stages are: preparation of the damaged surfaces by sand blasting, cutting the defects to form a cavity preventing and degreasing, coating application with subsequent machining to obtain a given geometry and surface quality. The obtained results expand opportunities of using the technology of cold gas-dynamic spraying of protection and restoration coatings both in automobile and aircraft engine manufacturing.

Scientific novelty. A new approach to design of technological processes for the formation of restoration coatings on the casing parts made of light alloys (magnesium and aluminum alloys) is developed based on the selection of technological spraying modes using a correlation map that can be used to analyze the influence of process parameters on the properties of coatings.

Practical value. The technology of cold gas-dynamic spraying can be widely used in repair production for the formation of protection and restoration coatings. Technological recommendations are developed and the technological process of restoration of the casing parts made of light alloys using cold gas-dynamic spraying is optimized.

Keywords: cold gas-dynamic spraying; restoration process; protection and restoration coatings.

REFERENCES

- [1]. Eliseev Ju. S. (1999). *Himiko-termicheseskaja obrabotka i zashhitnye pokrytija v aviadvigatelistroenii*. Moscow: Vysshaja shkola.
- [2]. Champagne V. K., Helfritch D. J. (2014). Mainstreaming cold spray – push for applications. *Surface Engineering*, 30 (6), 396–403.
- [3]. Champagne V.K., Champagne III V.K., Widener C. (2018). Cold-Spray Coatings: Recent Trends and Future perspectives. In P. Cavaliere (Ed.), *Cold Spray Applications* Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 25–56.
- [4]. Papyrin A. (2001). Cold Spray Technology. *Advanced Materials & Processes*, 159 (9), 49–51.
- [5]. Davis R. (2004). *Handbook of Thermal Spray Technology*. Ohio, USA: ASM International and the Thermal Spray Society.
- [6]. Assadi H., Gärtner F., Stoltenhoff T., Kreye H. (2003). Bonding mechanism in cold gas spraying. *Acta Materialia*, 51 (15), 4379–4394.
- [7]. Fomin V. M. (2010). *Holodnoe gazodinamicheskoe napylenie. Teorija i praktika*. Moscow: Fizmatlit.
- [8]. Maev R. G., Leshchynsky V. (2018). Cold-Spray Coatings: Recent Trends and Future perspectives. In P. Cavaliere (Ed.), *Low-Pressure Cold Spray*, 95–142. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- [9]. Shorinov A. V., Markovich S. E., Dolmatov A. I. (2017). Razrabotka tehnologicheskogo processa vosstanovlenija korpusnyh detalej aviacionnoj tehniki holodnym gazodinamicheskim napyleniem. *Aerospace technic and technology*, 9 (144), 98–102.
- [10]. Canales H., Markovych S., Dolmatov A. (2014). Statistical Analysis of the effect of process parameters and coatings properties in the low pressure cold spraying process. *Integrovani komp'juterni tehnologii v mashinobuduvanni (IKTM) : tezi dop. Vseukr. naukovno-tehn. Konf. Kharkiv, Ukraine: National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"*, 103.