

ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.793.79: 620.172.2: 629.7.018.4:620.193

СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ ПОКРЫТИЙ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ЗОНАХ КОРРОЗИОННОГО ПОРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ИЗ СПЛАВА 1163РДТВ

Лапаев А.В.^{1*}, Ряшин Н.С.^{2**}, Фомин В.М.^{2***}, Шикалов В.С.^{2****}

¹ Западно-Сибирский центр по сертификации объектов воздушного транспорта,
ул. Новая Заря, 2а, Новосибирск, 630084, Россия

² Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук,
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия

* e-mail: a.lapaev@inbox.ru

** e-mail: ryashinn@gmail.com

*** e-mail: fomin@itam.nsc.ru

**** e-mail: v.shikalov@gmail.com

Исследованы свойства и микроструктура алюминиевых покрытий, сформированных методом холодного газодинамического напыления (ХГН, cold spraying) на зонах коррозионного поражения подложек из конструкционного сплава 1163РДТВ. Представлены результаты исследования микроструктуры поперечных шлифов этих покрытий, полученные методами оптической и растровой электронной микроскопии. Экспериментально определены зависимости элементного состава, пористости и микротвердости полученных алюминиевых покрытий от температуры торможения T_0 . Например, при $T_0 = 200$ °С значение пористости составило 0,06 %. Показано, что ХГН-покрытие на зоне коррозионного поражения пластины из сплава 1163РДТВ восстанавливает характеристики статической прочности образца в упругой области диаграммы деформирования. Восстановлен фрагмент бывшего в эксплуатации стрингера самолета ТУ-154М (сплав серии В95) алюминиевым ХГН-покрытием. Результаты настоящей работы демонстрируют высокий потенциал метода холодного газодинамического напыления в восстановлении и ремонте элементов конструкции летательных аппаратов.

Ключевые слова: коррозия, восстановление авиационных конструкций, холодное газодинамическое напыление, алюминиевые покрытия, пористость, элементный состав, микротвердость, прочность, усталость.

Введение

Одной из актуальных задач при эксплуатации авиационной техники является поддержание летной годности воздушных судов (ВС) по условиям проч-

ности при эксплуатационных повреждениях. В рамках указанной задачи решаются вопросы научно-технического обоснования допускаемых эксплуатационных повреждений, применения технологий

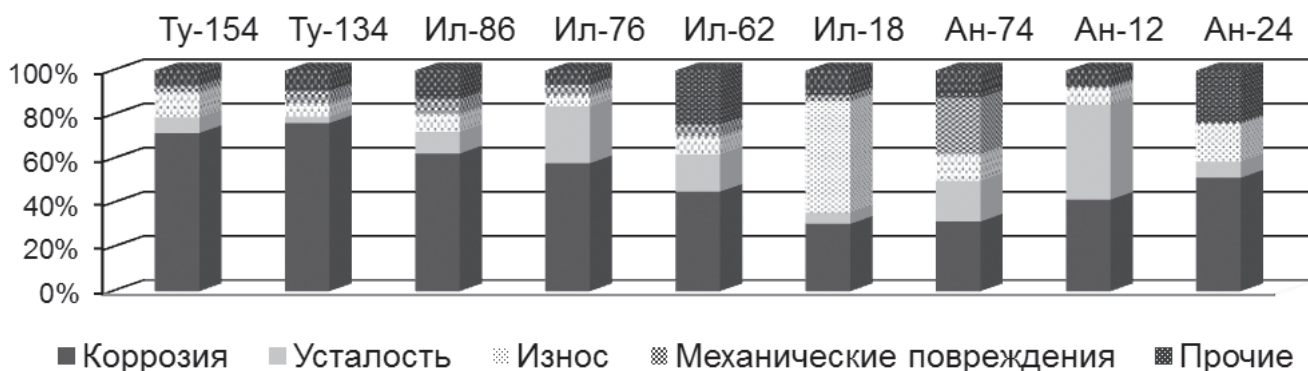


Рис. 1. Соотношение эксплуатационных повреждений планера самолетов

ремонта и восстановления элементов конструкции планера ВС в процессе эксплуатации. Проведенные исследования показали, что наиболее массовыми эксплуатационными повреждениями элементов конструкции планера ВС являются коррозионные поражения и усталостные трещины (рис. 1) [1–5].

При рассмотрении коррозионных поражений дополнительно в процессе эксплуатации необходимо решать задачу повышения защитных свойств зон конструкции, критических по условиям коррозии. Следовательно, требуются метод, технология и оборудование, позволяющие проводить ремонтно-восстановительные работы элементов конструкций с коррозионными поражениями более эффективными способами. Разработка такой технологии является одной из важных задач в эксплуатации. Для внедрения нового подхода в процессы ремонта элементов технических конструкций требуется его научное обоснование, в частности изучение влияния технологии ремонта на прочностные и эксплуатационные характеристики восстановленного элемента.

На сегодняшний день авторы проводят научно-исследовательские работы по формированию доказательной базы для оценки применимости технологии ремонта элементов конструкции планера ВС методом холодного газодинамического напыления (ХГН) при коррозионных поражениях в эксплуатации. Метод ХГН является относительно новой технологией формирования порошковых покрытий, разработанной в Институте теоретической и прикладной механики им С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН [6–8]. Главное отличие метода ХГН от хорошо известных газотермических методов (плазменного, газопламенного, детонационного и т.п.) состоит в том, что покрытие формируется в результате высокоскоростной деформации нерасплавленных микрочастиц при натекании сверхзвукового двухфазного потока на преграду (подложку). Умеренный уровень температур при ХГН создает уникальную возможность для минимизации теплового взаимодействия частиц с уско-

ряющим их рабочим газом и окружающей атмосферой (процессов окисления, испарения высокодисперсных фракций и т.д.) или даже полного их устранения. Это позволяет избежать некоторых негативных явлений, таких, как образование сквозных пор в покрытии при кристаллизации, высокотемпературные напряжения в покрытии, температурное разложение композиционных материалов и др. Физические особенности ХГН позволяют существенно расширить возможности порошковых методов нанесения покрытий и разрабатывать новые технологии создания покрытий различного функционального назначения: электропроводящих (электротехнические изделия), упрочняющих, коррозионно-стойких, температуро- и жаростойких и др. Основные результаты исследований явления ХГН и создаваемых с помощью одноименного метода покрытий изложены в монографиях [8, 9].

Технология ремонта авиационных конструкций, разрабатываемая на основе метода холодного газодинамического напыления, позволяет восстановить рабочие характеристики поврежденного элемента конструкции планера без его демонтажа, что может существенно сократить эксплуатационные расходы на ремонтно-восстановительные работы. Результаты зарубежных исследований применимости метода ХГН для ремонта конструкций из авиационных сплавов представлены в [10–17].

Целью настоящей работы является установление связи свойств алюминиевых ХГН-покрытий на зонах коррозионного поражения подложек из конструкционного сплава 1163РДТВ с параметрами напыления, первичное определение прочностных характеристик восстановленных образцов и демонстрация возможностей холодного газодинамического напыления как способа восстановления участков коррозионного поражения авиационных конструкций.

Материалы и методы

В качестве подложек для напыления использовались пластины из алюминиевого сплава

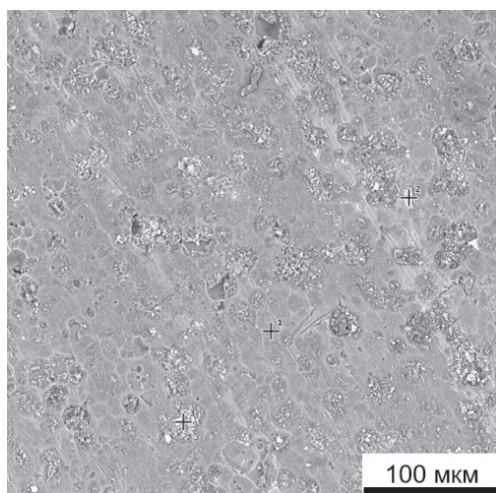
1163РДТВ размером $105 \times 25 \times 1.8$ мм, на которых были смоделированы коррозионные повреждения в виде поверхностной коррозии глубиной 20% от толщины пластины. На рис. 2 представлены микрофотографии поверхности образца без коррозии (а) и в зоне коррозионного поражения (б).

В экспериментах по нанесению восстанавливающих ХГН-покрытий использовался порошок алюминия марки АСД-1 (СУАЛ-ПМ, Россия) со сферической формой частиц. На рис. 3 представлены микрофотография частиц данного порошка (а) и их объёмная функция распределения по размерам (б), полученные с помощью растрового электронного микроскопа EVO MA 15 (Zeiss, Германия) и лазерного дифракционного анализатора размеров частиц LS 13 320 (Beckman Coulter, США) соответственно. Средний измеренный размер частиц порошка АСД-1 составил 27 мкм.

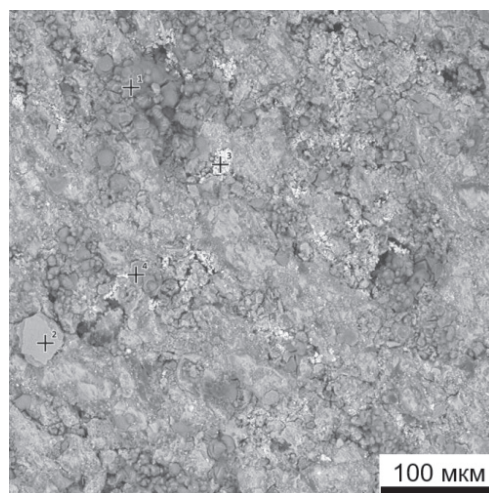
Восстанавливающие алюминиевые покрытия наносились с помощью экспериментального стен-

да ХГН (ИТПМ Сибирского отделения РАН, Россия), оснащенного пылешумозащитной камерой с системой вытяжной вентиляции. Основными узлами стенда являются: блок управления, дозатор порошка высокого давления, нагреватель рабочего газа, форкамерно-сопловой блок и промышленный 6-осевой робот-манипулятор KR 16-2 с контроллером KR C4 (KUKA Robotics, Германия). Фотография узлов экспериментального стенда ХГН в пылешумозащитной камере представлена на рис. 4. В экспериментах по напылению использовалось осесимметричное сверхзвуковое сопло с диаметрами критического и выходного сечений 2,8 и 6,5 мм соответственно.

Рабочий газ (воздух) подавался в форкамеру с постоянным давлением торможения и температурой торможения T_0 , варьируемой в интервале от 180 до 320 °С. Модельная зона коррозионного поражения подвергалась пескоструйной обработке абразивом из корунда фракцией 250 мкм. После проведе-

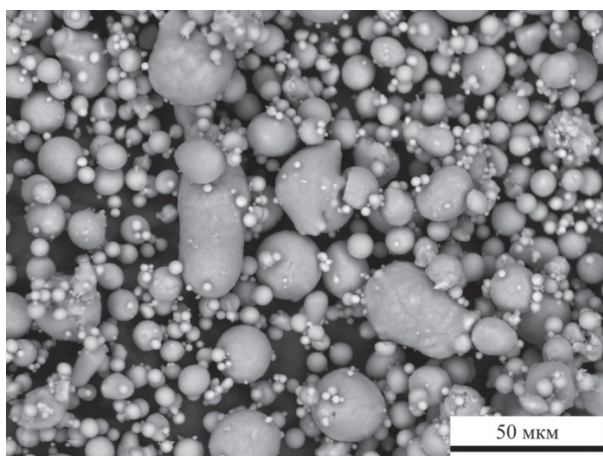


а)

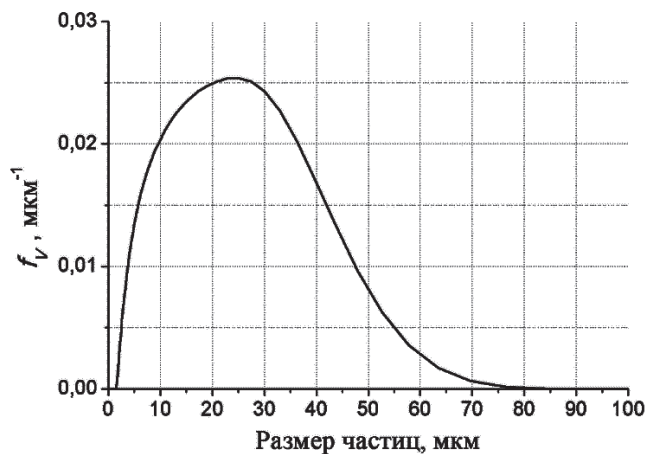


б)

Рис. 2. Электронная микрофотография поверхности пластины из алюминиевого сплава 1163РДТВ «как есть» (а) и в зоне смоделированного коррозионного поражения (б)



а)



б)

Рис. 3. Микрофотография (а) и объёмная функция распределения по размерам (б) частиц алюминиевого порошка АСД-1. Средний размер частиц 27 мкм

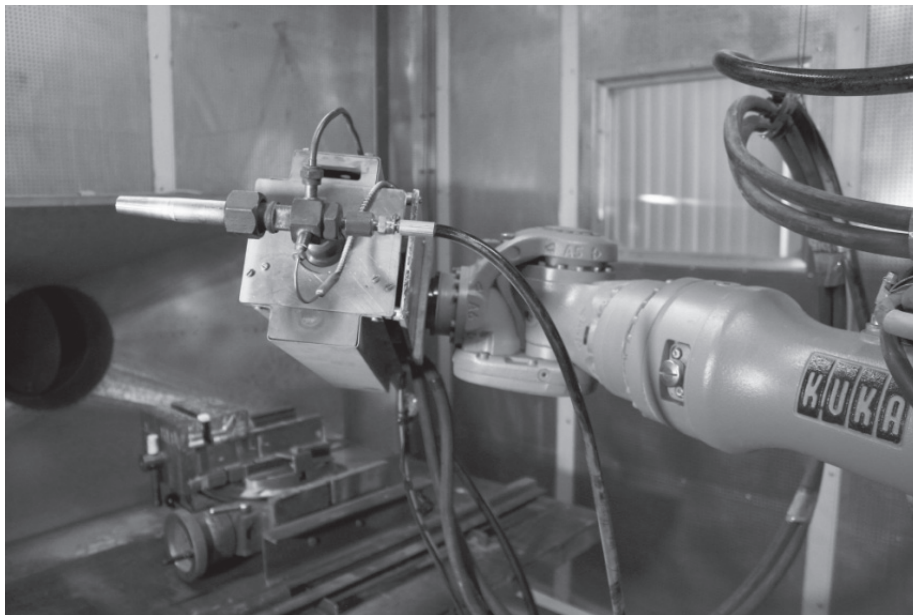


Рис. 4. Сопловой узел и нагреватель экспериментального стенда холодного газодинамического напыления ИТПМ Сибирского отделения РАН на промышленном роботе KR 16-2 в пылешумозащитной камере

ния подготовки на зону коррозионного поражения образца наносилось восстанавливающее ХГН-покрытие с припуском по толщине примерно 300 мкм. Скорость перемещения сопла относительно подложки и дистанция напыления были постоянными.

На рис. 5 показаны фотографии смоделированной зоны коррозионного поражения (а), а также образца, восстановленного с помощью метода ХГН (б) и шлифованного после восстановления (в).

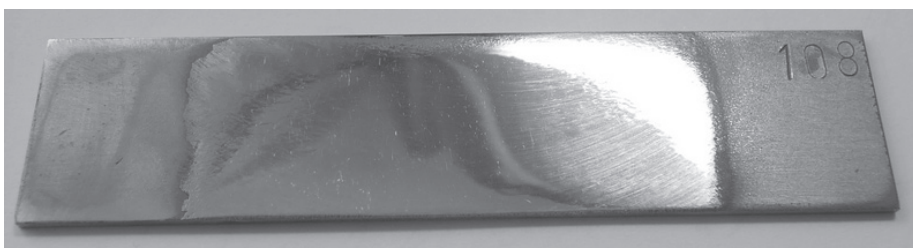
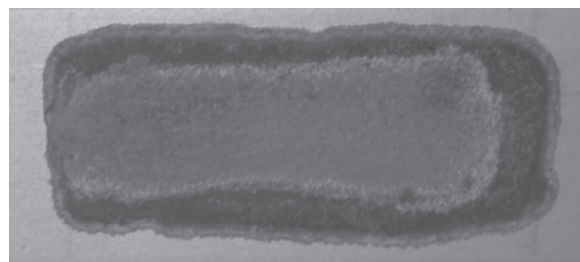


Рис. 5. Вид смоделированной зоны коррозионного поражения образца из сплава 1163РДТВ (а), результат восстановления этого участка алюминиевым ХГН-покрытием «как нанесено» (б) и после шлифования до номинального размера толщины (в)

Контроль качества поперечных шлифов восстановленных образцов осуществлялся с помощью оптического микроскопа AxioScore.A1 (Zeiss, Германия). На рис. 6,а представлен пример микрофотографии поперечного шлифа образца, восстановленного методом ХГН при $T_0 = 200\text{ }^\circ\text{C}$.

Пористость ХГН-покрытий измерялась по оптическим микрофотографиям их шлифов с помощью металлографической системы на базе микроскопа GX-51 (OLYMPUS, Япония). Для каждого образца осуществлялось пять измерений на различных участках поперечного шлифа покрытия, по которым рассчитывалось среднее значение пористости.

Элементный состав ХГН-покрытий исследовался на их поперечных микрошлифах с помощью компактного растрового электронного микроскопа

TM3000 (Hitachi, Япония), оснащенного энергодисперсионной приставкой Quantax 70 (Bruker, США). Пример микрофотографии поперечного шлифа образца, полученной с помощью этого микроскопа в режиме обратно-рассеянных электронов, представлен на рис. 6,б. Пример спектра, зарегистрированного на участке поперечного сечения ХГН-покрытия, представлен на рис. 6,в.

По результатам количественного элементного анализа полученных покрытий была определена зависимость содержания кислорода в восстанавливающих алюминиевых покрытиях ХГН от температуры торможения воздушного потока T_0 в процессе нанесения этих покрытий.

Микротвердость полученных алюминиевых ХГН-покрытий измерялась на поперечных шлифах по методу Виккерса с помощью автоматического

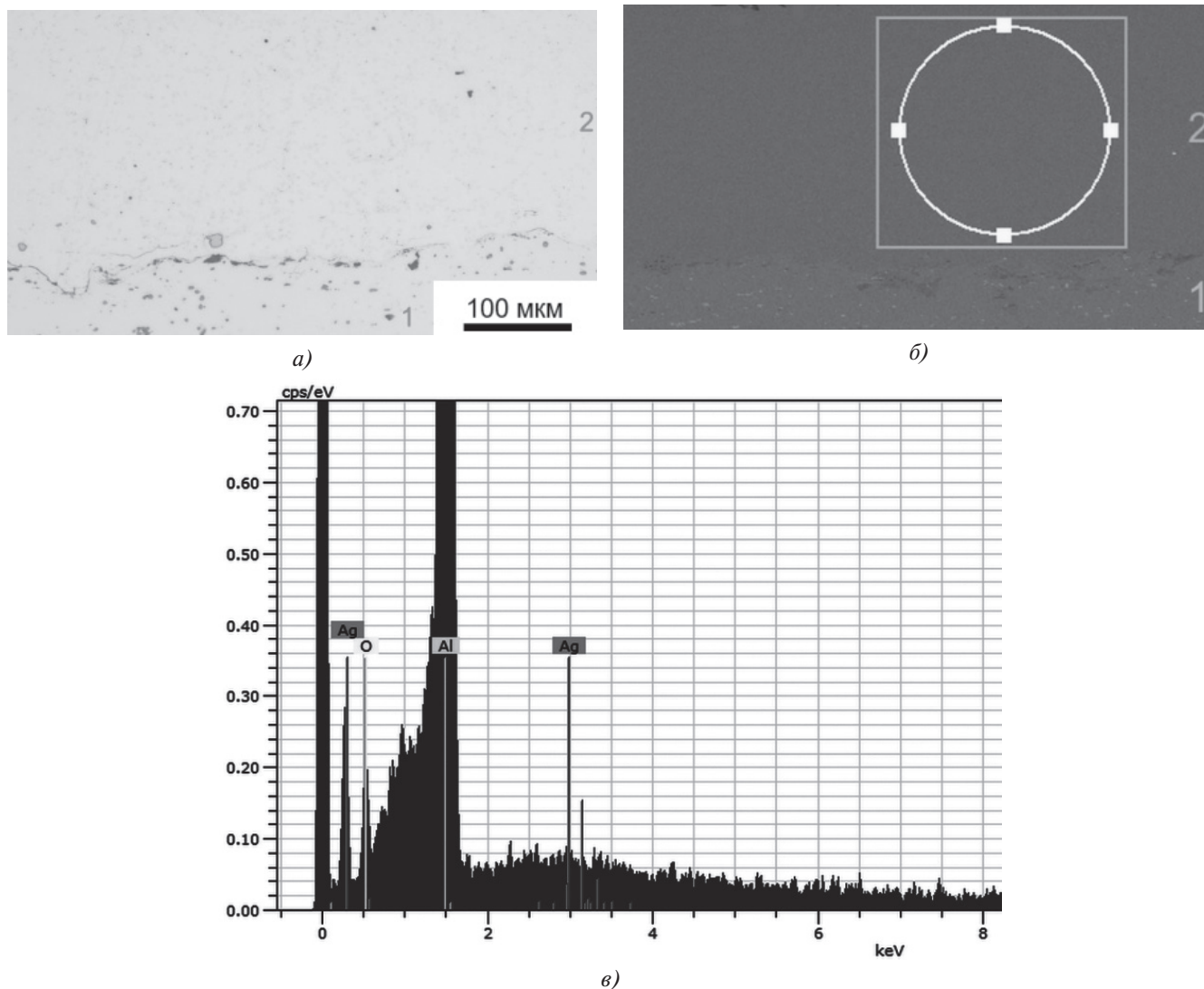


Рис. 6. Микрофотографии поперечного шлифа алюминиевого ХГН-покрытия, нанесенного при $T_0 = 200\text{ }^\circ\text{C}$ на зону коррозионного поражения пластины из сплава 1163РДТВ, полученные с помощью оптического (а) и растрового электронного (б) микроскопов, и спектр химических элементов в этом покрытии (в): 1 — пластина из сплава 1163РДТВ; 2 — покрытие из порошка АСД-1; окружностью выделен участок, для которого получены результаты элементного анализа

микротвердомера DuraScan 50 (Emco-Test, Австрия). Для каждого образца было выполнено 10 эквидистантных измерений вдоль прямой линии. По полученным данным рассчитывались средние значения микротвердости HV0.1. В случае прохождения линии измерения через пору отпечаток, попадающий в пору, смещался на 50 мкм от границы поры и равноудаленно от двух соседних отпечатков.

Подготовка поверхности восстановленных методом ХГН образцов для прочностных испытаний проводилась на шлифовально-полировальном круге в ручном режиме и состояла из трех этапов. На первом этапе осуществлялось предварительное грубое снятие припуска слоя напыления. На втором этапе осуществлялась чистовая обработка поверхности до номинальной толщины заготовки. Третий этап заключался в финишной полировке восстановленной поверхности.

Для статических испытаний выполнялось фрезерование образцов в соответствии с требованиями к пропорциональным плоским образцам типа I согласно ГОСТ 1497-84 (рис. 7,а). Испытания проводились с помощью машины Instron 3369 (Instron, Великобритания) при температуре среды +20 °С.

Для усталостных испытаний использовались плоские пропорциональные образцы с центральным отверстием типа VII согласно ГОСТ 25.502-79 (рис. 7,б). Испытания на усталость проводились с помощью испытательной электрогидравлической машины Instron 8801 (Instron, Великобритания) при отнулевом цикле нагружения и температуре среды +20 °С.

Результаты и обсуждение

Графики зависимостей атомной концентрации кислорода $c_{at}(O)$ в ХГН-покрытии из алюминиевого порошка АСД-1 и числа нанесенных слоев n , необходимых для достижения заданной толщины этого покрытия, от температуры торможения T_0 представлены на рис. 8.

Согласно работам [17, 18] коэффициент напыления k_d , равный отношению массы покрытия к массе использованного для его нанесения порошка, прямо зависит от T_0 . Как видно из рис. 8, данная зависимость проявляется в настоящем исследовании в существенном снижении числа слоев, необходимых для нанесения ХГН-покрытия заданной толщины, в силу того что, благодаря увеличению k_d , с ростом температуры торможения значительно растет толщина слоя покрытия, нанесенного за одно сканирование подложки соплом. Следует отметить, что в воздушной атмосфере в данных условиях напыления возможно окисление алюминия на поверхности каждого нанесенного слоя в том интервале времени, в котором соплом сканируется другой участок образца, и уже нанесенный слой взаимодействует с окружающим воздухом. Этим объясняется обратная зависимость концентрации кислорода в алюминиевом ХГН-покрытии от T_0 : выше температура торможения при нанесении покрытия, меньше число слоев в покрытии, следовательно, меньше оксидов, образованных на поверхности каждого такого слоя.

На рис. 9 показаны графики экспериментальных зависимостей пористости и микротвердости

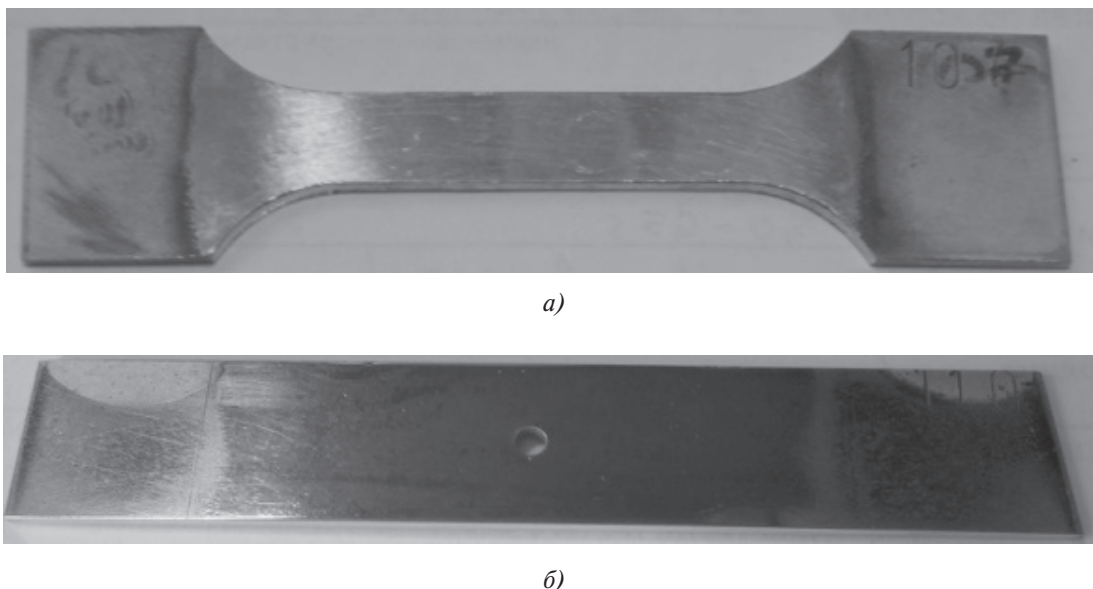


Рис. 7. Виды образца типа I из сплава 1163РДТВ, восстановленного методом ХГН, после полировки и фрезерования согласно ГОСТ 1497-84 для статических испытаний (а) и образца типа VII в виде полосы с центральным отверстием согласно ГОСТ 25.502-79 для усталостных испытаний (б)

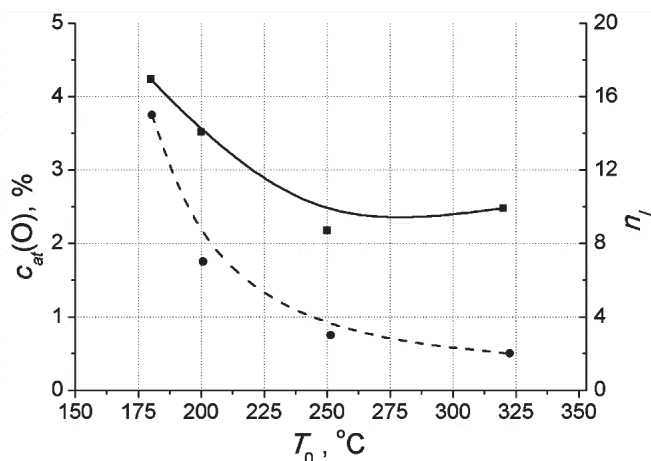


Рис. 8. График зависимости атомной концентрации кислорода $c_{at}(O)$ в ХГН покрытии из алюминиевого порошка АСД-1 и числа слоев n_l , необходимых для достижения заданной толщины этого покрытия, от температуры торможения T_0

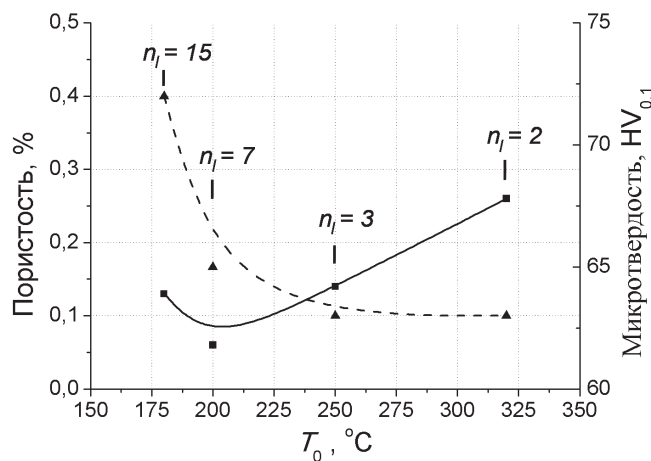


Рис. 9. Зависимость пористости алюминиевых ХГН-покрытий на зонах коррозионного поражения сплава 1163РДТВ от температуры торможения рабочего газа T_0 и числа слоев в покрытии n_l

алюминиевых ХГН-покрытий на зонах коррозионного поражения пластин из сплава 1163РДТВ от T_0 и числа слоев n_l в этих покрытиях.

Прямая зависимость пористости и обратная зависимость микротвердости алюминиевых ХГН-покрытий от температуры торможения также

связаны с числом слоев, необходимых для формирования покрытий заданной толщины, другими словами, с коэффициентом напыления. При сравнительно низком k_d возрастает число частиц порошка, ударившихся о преграду и отскочивших от нее. Такие частицы деформируют уже закрепившиеся на

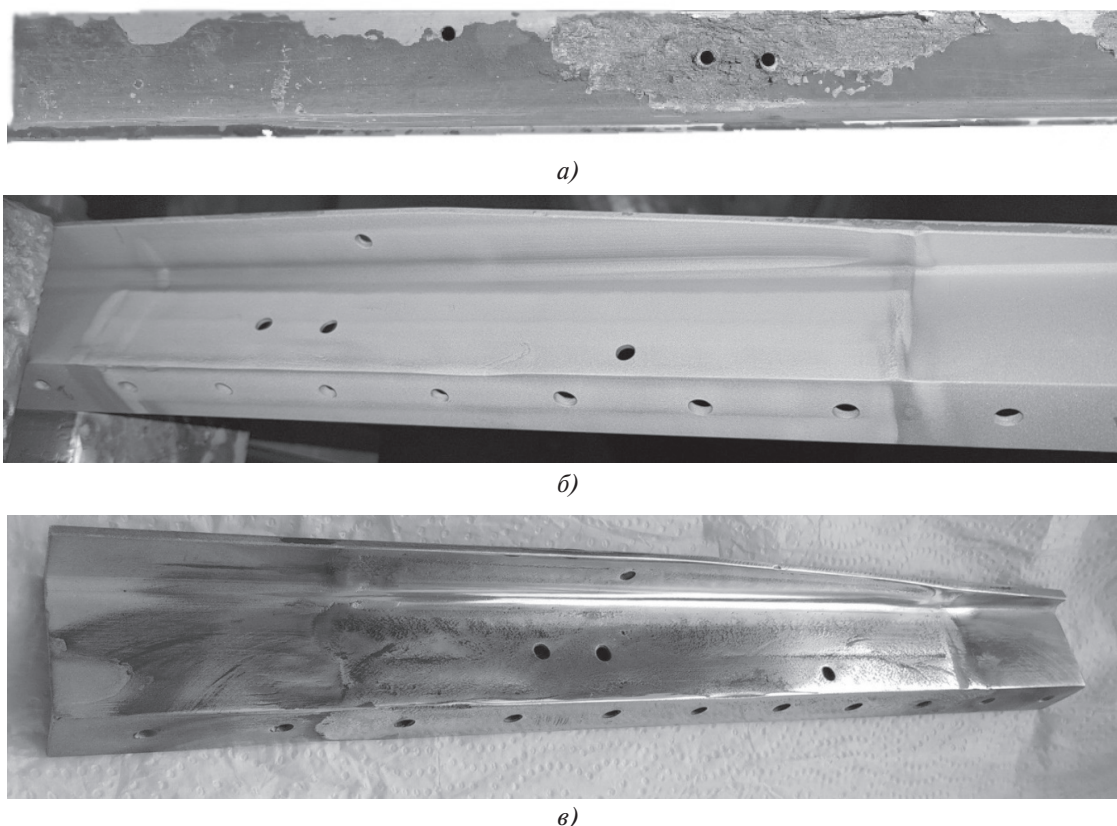


Рис. 10. Стрингер, восстановленный методом холодного газодинамического напыления: исходное состояние участка стрингера, демонтированного с конструкции самолета Ту-154М в процессе ремонта (а), участок стрингера с зоной коррозионного поражения после зачистки от продуктов коррозии (б), участок стрингера после восстановления ХГН-покрытием (в)

подложке частицы, «вминая» их в покрытие и обеспечивая известный эффект «наклепа». В результате такого «наклепа» и снижается пористость, а дополнительные деформации закрепившихся частиц определяют увеличение числа дефектов в их кристаллической решетке и, соответственно, микротвердости всего ХГН-покрытия в целом.

На образцах, восстановленных с помощью таких покрытий, проведены испытания при статическом и циклическом нагружении. Анализ полученных экспериментальных результатов [19—21] показал, что для рассмотренного режима нанесения ХГН-покрытия полного восстановления характеристик статической прочности образца не происходит. Тем не менее восстановление алюминиевым ХГН-покрытием коррозионного поражения пластины из сплава 1163РДТВ повышает характеристики статической прочности образца в упругой области диаграммы деформирования. В испытаниях на усталость было установлено влияние концентратора напряжений на усталостную прочность покрытия, что следует учитывать в применении ХГН-покрытий [21].

В качестве демонстрации потенциала метода ХГН в задачах ремонта авиационных конструкций проведено восстановление участка стрингера самолета Ту-154М (алюминиевый сплав серии В95) с коррозионным поражением, обнаруженным в процессе эксплуатации (рис. 10).

Выводы

Проведено восстановление зон коррозионного поражения на пластинах из авиационного конструкционного сплава 1163РДТВ с помощью алюминиевых покрытий, сформированных методом холодного газодинамического напыления. Получены экспериментальные зависимости пористости и микротвердости ХГН-покрытий и содержания кислорода в них от температуры торможения при напылении. Данные зависимости позволили выбрать наилучший режим нанесения покрытий для восстановления конструкционных элементов с коррозионным поражением. Показано, что нанесение ХГН-покрытия на зону коррозионного поражения пластины из сплава 1163РДТВ восстанавливает характеристики ее статической прочности в упругой области диаграммы деформирования. В испытаниях на усталость было установлено влияние концентратора напряжений на усталостную прочность покрытия, что следует учитывать в применении ХГН-покрытий. Проведено восстановление методом ХГН бывшего в эксплуатации стрингера самолета Ту-154М. Показано, что метод холодного газодинамического напыления является перспективным высокотехнологичным способом ремонта эле-

ментов авиационных конструкций при коррозионном поражении, позволяющим частично восстановить характеристики поврежденного элемента конструкции. Это определяет важность проведения комплекса исследований, необходимых для разработки на основе метода ХГН-технологии метода ремонта воздушных судов, получивших эксплуатационные повреждения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда
(код проекта 16-19-10300).*

Библиографический список

1. Волчек В.А., Зубарев А.П., Лапаев А.В., Шапкин В.С. Оценка технического состояния планера самолетов типа Ту-154Б при продлении ресурса // Научный вестник МГТУ ГА. Серия Аэромеханика и прочность. 2002. №53. С. 27-31.
2. Акопян К.Э., Бутушин С.В., Гришин А.Н., Лапаев А.В., Семин А.В., Шапкин В.С. Теория и практика оценки коррозионных повреждений элементов конструкции воздушных судов // Под ред. В.С. Шапкина, С.В. Бутушина. — М.: НЦ ПЛГ ВС ГосНИИ ГА, 2010. — 288 с.
3. Лапаев А.В., Шапкин В.С. К вопросу оценки влияния коррозионных поражений планера на летную годность воздушных судов по условиям усталостной прочности // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2014. № 4. С. 17-21.
4. Дунаев В.В., Громов В.Ф., Еремин М.В. Воздействие технологических напряжений в механических соединениях на коррозионную прочность высокопрочного сплава Д16Т // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 4. С. 115-119.
5. Туманов Н. В. Физико-механические аспекты устойчивого роста усталостных трещин // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 2. С. 132-136.
6. Alkhimov A.P., Kosarev V.F., Papyrin A.N. A method of «cold» gas-dynamic deposition // Soviet Physics Doklady. 1990. Vol. 35, pp. 1062-1065.
7. Alkhimov A.P., Papyrin A.N., Kosarev V.F., Nesterovich N.I., Shushapanov M.M. Gas-dynamic spraying method for applying a coating. Patent US 5302414 A. Apr. 12, 1994.
8. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика: Монография. — М.: Физматлит, 2010. — 535 с.
9. Maev R., Leschchynsky V. Introduction to Low Pressure Gas Dynamic Spray. — Weinheim: Physics & Technology, Wiley-VCH, 2008. 244 p.
10. Jones R., Matthews N., Rodopoulos C.A., Cairns K., Pitt S. On the use of supersonic particle deposition to restore the structural integrity of damaged aircraft structures // International Journal of Fatigue. 2011. Vol. 33. No. 9, pp. 1257-1267. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2011.03.013

11. Jones R., Molent L., Barter S., Matthews N., Tamboli D. Supersonic particle deposition as a means for enhancing the structural integrity of aircraft structures // International Journal of Fatigue. 2014. Vol. 68, pp. 260-268. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.03.013
12. Yandouzi M., Gaydos S., Guo D., Ghelichi R., Jodoin B. Aircraft skin restoration and evaluation // Journal of Thermal Spray Technology. 2014. Vol. 23. No. 8, pp. 1281-1290. DOI: 10.1007/s11666-014-0130-1
13. Cavaliere P., Silvello A. Crack Repair in Aerospace Aluminum Alloy Panels by Cold Spray // Journal of Thermal Spray Technology. 2017. Vol. 26. No. 4, pp. 661-670. DOI: 10.1007/s11666-017-0534-9
14. Blochet Q., Delloro F., N'Guyen F., Jeulin D., Borit F., Jeandin M. Effect of the Cold-Sprayed Aluminum Coating-Substrate Interface Morphology on Bond Strength for Aircraft Repair Application // Journal of Thermal Spray Technology. 2017. Vol. 26. No. 4, pp. 671-686. DOI: 10.1007/s11666-017-0548-3
15. Rech S., Trentin A., Vezzù S., Vedelago E., Legoux J.-G., Irissou E. Different Cold Spray Deposition Strategies: Single— and Multi-layers to Repair Aluminium Alloy Components // Journal of Thermal Spray Technology. 2014. Vol. 23. No 8, pp. 1237-1250. DOI: 10.1007/s11666-014-0141-y
16. Widener C.A., Carter M.J., Ozdemir O.C., Hrabe R.H., Hoiland B., Stamey T.E., Champagne V.K., Eden T.J. Application of High-Pressure Cold Spray for an Internal Bore Repair of a Navy Valve Actuator // Journal of Thermal Spray Technology. 2015. Vol. 25. No. 1-2, pp. 193-201. DOI: 10.1007/s11666-015-0366-4
17. Krebs S., Gartner F., Klassen T. Cold Spraying of Cu-Al-Bronze for Cavitation Protection in Marine Environment // Journal of Thermal Spray Technology. 2015. Vol. 24. No 1-2, pp. 126-135. DOI: 10.1007/s11666-014-0161-7
18. Shikalov V.S., Klinkov S.V., Kosarev V.F. Cold spraying on materials with low erosion resistance // Proceedings of the 18th International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR). 2016. DOI: 10.1063/1.4964084
19. Shikalov V.S., Ryashin N.S., Lapaev A.V. Cold spray repairing corrosively damaged areas on aircraft constructions // Solid State Phenomena. 2017. Vol. 265, pp. 325-330. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.325
20. Шанкин В.С., Ланаев А.В., Ланаев В.П., Косарев В.Ф., Клинков С.В., Ряшин Н.С. Разработка функциональных покрытий для восстановления элементов конструкции планера воздушных судов при коррозионных поражениях // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2016. № 15. С. 21-32.
21. Shapkin V.S., Lapaev A.V., Shikalov V.S., Zubkov B.V., Kuleshov A.A. Restoration of aluminium alloy strength properties by cold spray after corrosion damage // International Journal of Mechanical Engineering & Technology (IJMET). 2017. Vol. 8. No. 7, pp. 1929-1941, https://www.iaeme.com/MasterAdmin/uploadfolder/IJMET_08_07_214/IJMET_08_07_214.pdf

PROPERTIES OF ALUMINUM COATINGS OF COLD GAS-DYNAMIC SPRAYING AT CORROSION DAMAGE ZONES OF 1163RDTV ALLOY PRODUCTS

Lapaev A.V.^{1*}, Ryashin N.S.^{2}, Fomin V.M.^{2***}, Shikalov V.S.^{2****}**

¹ Western Siberian Center for the Certification of Air Transport Objects,
2a, Novaya Zarya str., Novosibirsk, 630084, Russia

² Federal State Budgetary Institute of Science Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
4/1, Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russia

* e-mail: a.lapaev@inbox.ru

** e-mail: ryashinn@gmail.com

*** e-mail: fomin@itam.nsc.ru

**** e-mail: v.shikalov@gmail.com

Abstract

Cold gas-dynamic spraying is a method for coating process, creation of 3D objects and new materials from powder metals, alloys, composites and powder mixtures. The method was developed based on cognominal physical phenomenon, discovered at the Institute of Theoretical and Applied Mechanics named after S.A.

Khristianovich of Siberian branch of the Russian academy of sciences in the early 1980's. Nozzle assembly and a heater are fixed as a part of the cold gas-dynamic spraying test bench based on the industrial robot KR 16-2 in dust-noise proof chamber. While spraying the powder particles are accelerated by the gas flow to the velocities of 400-1200 m/s and form the coating without

melting. In a number of works of domestic and foreign researchers the possibility of metallic objects recovery by this method is demonstrated, whereby the study of coatings and materials obtained by this method presents an undoubted scientific and practical interest.

The presented article studies the properties of aluminum coatings formed by the cold gas-dynamic spraying method at corrosion damage zones of the substrates from 1163RDTV structural alloy.

At the first stage of work corrosion damages in the form of surface corrosion of the plates from the 1163RDT alloy were simulated. Then they were recovered by the cold gas-dynamic spraying coatings from ASD-1 aluminum powder. The average measured size of the ASD-1 powder particles was 27 mcm.

Experimental dependencies of porosity and micro-hardness of these coatings and oxygen content in them from deceleration temperature while spraying were obtained. These dependencies allowed select the better coating process mode for performance characteristics recovery of structural elements with corrosion damage.

During the experiments of the second stage the samples recovered by the cold gas-dynamic spraying coatings from the 1163RDTV alloy were tested on tensile strength while static loading. Experimental deformation and fatigue endurance curves were obtained. Due to the low porosity and micro-hardness of the cold gas-dynamic spraying coatings, applied at $T_0 = 200^\circ\text{C}$, the samples with corrosion zones recovered by these coatings were selected for static and fatigue stretching tests. The obtained experimental results analysis revealed that with the considered coating process mode the full static hardness characteristics recovery did not occur. Nonetheless, an Al recovery by the cold gas-dynamic spraying coating from 1163RDTV alloy increases the sample static hardness characteristics in the elastic region of the deformation curve. The fatigue tests revealed the effect of the stress concentrator on fatigue strength, which should be accounted while cold gas-dynamic spraying application for recovering corroded structural elements.

At the final stage of the work, a coating from ASD-1 was formed on the TU-154 stringer fragment (an alloy of B95 series). It demonstrates the ability of applying these coatings on the fuselage frame elements.

The results of the presented work demonstrate the high potential of the cold gas-dynamic spraying method in solving the problems of aircraft construction elements recovery and repair.

Keywords: corrosion, aircraft structures recovery, cold gas-dynamic spraying, aluminum coating, porosity, elemental composition, micro-hardness, strength, fatigue.

References

1. Volchek V.A., Zubarev A.P., Lapaev A.V., Shapkin V.S. *Nauchnyi vestnik MGTU GA. Seriya Aeromekhanika i prochnost'*, 2002, no. 53, pp. 27-31.
2. Akopyan K.E., Butushin S.V., Grishin A.N., Lapaev A.V., Semin A.V., Shapkin V.S. *Teoriya i praktika otsenki korrozionnykh povrezhdenii elementov konstruktivnykh vozdukhnykh sudov* (Theory and practice of aircraft structural elements corrosion damage), Moscow, NTS PLG VS GosNII GA, 2010, 288 p.
3. Lapaev A.V., Shapkin V.S. *Nauchnyi vestnik GosNII GA*, 2014, no. 4, pp. 17-21.
4. Dunaev V.V., Gromov V.F., Eremin M.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2012, vol. 19, no. 4, pp. 115-119.
5. Tumanov N.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 132-136.
6. Alkhimov A.P., Kosarev V.F., Papyrin A.N. A method of "cold" gas-dynamic deposition. *Soviet Physics Doklady*, 1990, vol. 35, pp. 1062-1065.
7. Alkhimov A.P., Papyrin A.N., Kosarev V.F., Nesterovich N.I., Shushapanov M.M. Gas-dynamic spraying method for applying a coating. *Patent US 5302414 A*, 1994.
8. Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Fomin V.M. *Kholodnoe gazodinamicheskoe napylenie. Teoriya i praktika* (Cold gas-dynamic spraying. Theory and practice), Moscow, Fizmatlit, 2010, 535 p.
9. Maev R., Leschchynsky V. *Introduction to Low Pressure Gas Dynamic Spray*. Weinheim, Physics & Technology, Wiley-VCH, 2008, 244 p.
10. Jones R., Matthews N., Rodopoulos C.A., Cairns K., Pitt S. On the use of supersonic particle deposition to restore the structural integrity of damaged aircraft structures. *International Journal of Fatigue*, 2011, vol. 33, no. 9, pp. 1257-1267. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2011.03.013
11. Jones R., Molent L., Barter S., Matthews N., Tamboli D. Supersonic particle deposition as a means for enhancing the structural integrity of aircraft structures. *International Journal of Fatigue*, 2014, vol. 68, pp. 260-268. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.03.013
12. Yandouzi M., Gaydos S., Guo D., Ghelichi R., Jodoin B. Aircraft skin restoration and evaluation. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014, vol. 23, no. 8, pp. 1281-1290. DOI: 10.1007/s11666-014-0130-1
13. Cavaliere P., Silvello A. Crack Repair in Aerospace Aluminum Alloy Panels by Cold Spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, vol. 26, no. 4, pp. 661-670. DOI: 10.1007/s11666-017-0534-9
14. Blochet Q., Delloro F., N'Guyen F., Jeulin D., Borit F., Jeandin M. Effect of the Cold-Sprayed Aluminum Coating-Substrate Interface Morphology on Bond Strength for Aircraft Repair Application. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, vol. 26, no. 4, pp. 671-686. DOI: 10.1007/s11666-017-0548-3
15. Rech S., Trentin A., Vezzù S., Vedelago E., Legoux J.-G., Irissou E. Different Cold Spray Deposition Strategies: Single- and Multi-layers to Repair

- Aluminium Alloy Components. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014, vol. 23, no. 8, pp. 1237–1250. DOI: 10.1007/s11666-014-0141-y
16. Widener C.A., Carter M.J., Ozdemir O.C., Hrabe R.H., Hoiland B., Stamey T.E., Champagne V.K., Eden T.J. Application of High-Pressure Cold Spray for an Internal Bore Repair of a Navy Valve Actuator. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2015, vol. 25, no. 1-2, pp. 193–201. DOI: 10.1007/s11666-015-0366-4
17. Krebs S., Gartner F., Klassen T., Cold Spraying of Cu-Al-Bronze for Cavitation Protection in Marine Environment. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2015, vol. 24, no. 1-2, pp. 126–135. DOI: 10.1007/s11666-014-0161-7
18. Shikalov V.S., Klinkov S.V., Kosarev V.F. Cold spraying on materials with low erosion resistance. *Proceedings of the 18th International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR)*. 2016. DOI: 10.1063/1.4964084
19. Shikalov V.S., Ryashin N.S., Lapaev A.V. Cold spray repairing corrosively damaged areas on aircraft constructions. *Solid State Phenomena*, 2017, vol. 265, pp. 325–330. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.325
20. Shapkin V.S., Lapaev A.V., Lapaev V.P., Kosarev V.F., Klinkov S.V., Ryashin N.S. *Nauchnyi vestnik GosNII GA*, 2016, no. 15, pp. 21–32.
21. Shapkin V.S., Lapaev A.V., Shikalov V.S., Zubkov B.V., Kuleshov A.A. Restoration of aluminium alloy strength properties by cold spray after corrosion damage. *International Journal of Mechanical Engineering & Technology (IJMET)*, 2017, vol. 8, no. 7, pp. 1929–1941, https://www.iaeme.com/MasterAdmin/uploadfolder/IJMET_08_07_214/IJMET_08_07_214.pdf

Редакторы *М.С. Винниченко, Е.Л. Мочина*
Художественное оформление *В.И. Володиной, И.В. Романовой*
Компьютерная верстка *О.Г. Лавровой*

Сдано в набор 05.06.18. Подписано в печать 9.07.18.
Бумага писчая. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 27,90. Уч.-изд. л. 30,00. Тираж 140 экз. Заказ 907/621.

Издательство МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993
Типография Издательства МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993