

Научная статья

УДК 669.058

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-96-106

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВА ВАС-1 МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

И.А. Козлов¹, М.А. Фомина¹, С.А. Демин¹, И. Бенариев¹, К.М. Хмелева¹

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

Аннотация. При эксплуатации деталей авиационной техники возможно возникновение внутренних напряжений, приводящих к появлению трещин, а также образование дефектов вследствие воздействия ударных нагрузок, что может привести к разрушению детали и конструкции. Метод холодного газодинамического напыления (ХГН) металлов позволяет не только наносить различные защитные и функциональные покрытия, но и при использовании пластичных материалов эффективно устранять дефекты деталей и узлов различного назначения.

Ключевые слова: ремонт, ХГН-покрытия, аддитивные технологии, алюминиевые покрытия, Димет-405, напыление газодинамическим методом

Для цитирования: Козлов И.А., Фомина М.А., Демин С.А., Бенариев И., Хмелева К.М. Использование металлопорошковых композиций для устранения дефектов деталей из сплава ВАС-1 методом холодного газодинамического напыления // Труды ВИАМ. 2022. № 12 (118). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-96-106.

Scientific article

USE OF METAL POWDER COMPOSITIONS TO REMOVE DEFECTS OF PARTS FROM VAS-1 ALLOY BY COLD GAS-DYNAMIC SPRAYING METHOD

I.A. Kozlov¹, M.A. Fomina¹, S.A. Demin¹, I. Benariev¹, K.M. Khmeleva¹

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

Abstract. During the operation of aircraft parts, internal stresses may occur, leading to the appearance of cracks, as well as the formation of defects due to impact loads, which can lead to the destruction of the part and structure. The method of cold gas-dynamic spraying (CGS) of metals makes it possible not only to apply various protective and functional coatings, but also, when using plastic materials, to effectively eliminate defects in parts and assemblies for various purposes.

Keywords: repair, CGN-coatings, additive technologies, aluminum coatings, Dimet-405, gas-dynamic spraying

For citation: Kozlov I.A., Fomina M.A., Demin S.A., Benariev I., Khmeleva K.M. Use of metal powder compositions to remove defects of parts from VAS-1 alloy by cold gas-dynamic spraying method. *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-96-106.

Введение

В настоящее время в машиностроении предъявляют повышенные требования к свойствам материалов, используемых для изготовления деталей и конструкций с целью повышения их ресурса изделий.

В основу инновационной модернизации производства авиационной техники положено создание не только современных материалов, но и технологий их обработки и защиты от воздействия окружающей среды.

Широкое использование в машиностроении алюминиевых сплавов приводит к необходимости разработки способов их защиты от коррозии и поиска метода локального восстановления деталей, уже поврежденных коррозией и эксплуатационными нагрузками. По экспертной оценке, в XXI в. более 80 % приоритетных разработок объектов новой техники будет определяться созданием новых материалов и высоких технологий.

С учетом современных темпов развития техники конструкторы выдвигают новые требования к повышению удельных характеристик материалов, в частности к алюминиевым сплавам. Для получения ответственных, высоконагруженных деталей требуются материалы, обладающие повышенной прочностью и высокой технологичностью при печати, поскольку данные сплавы имеют средний уровень прочности [1–5].

Для реализации изготовления деталей методом аддитивных технологий необходимы литейные сплавы с повышенной способностью к деформации. Этим условиям удовлетворяют сплавы систем алюминий–кремний и алюминий–магний. Среди них наиболее технологичными и распространенными являются порошки из сплава состава AlSi10Mg (BAC-1) [6, 7].

Однако при конструировании и эксплуатации сложнагруженных деталей и узлов авиационной техники возможно образование различных дефектов (трещин, сколов), приводящих к разрушению всей конструкции [8–10]. Замена поврежденной детали – дорогостоящий и длительный процесс. Поэтому в настоящее время актуальной задачей является локальное устранение дефектов деталей, по возможности без демонтажа всей конструкции [11–13].

Основными покрытиями, применяемыми для защиты от коррозии стальных деталей в изделиях авиационной техники, являются кадмиевое и цинковое, которые наносят гальваническим способом. Ремонт таких покрытий достаточно трудоемок в связи с тем, что необходимо полностью разобрать узел с деталью, удалить старое покрытие, нанести новое и провести операцию обезводороживания.

Метод холодного газодинамического напыления (ХГН) благодаря компактности установки и доступности расходных порошковых материалов позволяет проводить ремонт элементов авиационной техники непосредственно на изделии в условиях ремонтных ангаров или крытых помещений [14, 15].

Основной проблемой этого метода является частичное окисление металлических частиц в процессе нахождения в воздушном потоке при дополнительном внешнем нагреве. Решение данной проблемы – снижение температуры газового потока и, как следствие, снижение температуры проведения процесса, а также увеличение скорости напыления для наращивания большей кинетической энергии частиц при их неизменной массе и дисперсном составе.

Материалы и методы

Для проведения исследований использовали алюминиевый сплав состава AlSi10Mg (BAC-1), легированный медью, цирконием и церием в количестве не более 1 % (по массе) для каждого компонента. Изготовление металлопорошковой композиции для последующего сплавления проводили методом газовой атомизации на установке Hermiga 10/100 VI (Англия) с последующим отделением фракции размером <10 мкм при помощи газодинамической сепарации.

Исследования микроструктуры защитных покрытий проводили на металлографическом микроскопе Olympus GX 51 с цифровой системой обработки изображения при увеличении $\times 500$.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Газодинамический способ восстановления дефектов деталей основан на пластической деформации частиц при соударении с металлической подложкой детали и создании адгезионной связи за счет кинетической энергии напыляемых частиц [16].

В установке Димет-405 в качестве рабочей среды для ускорения частиц применяется сжатый воздух, который подается под давлением на вход сверхзвукового сопла Лавалья. Для повышения эффективности напыления за счет увеличения скорости воздушного потока, в напылительном блоке установлены нагревательные элементы до температур в пределах $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Проходя через них, воздушный поток разогревается до температур $\sim(80\text{--}130)\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вблизи выхода из сопла предусмотрено отверстие для подачи порошкового материала, который в результате созданного разряжения поднимается в сопло и захватывается потоком воздуха. Скорость потока придает значительную кинетическую энергию частицам порошка, несмотря на их малый размер. Благодаря этой энергии и происходит не только пластическая деформация металлических порошковых материалов, но и их внедрение в структуру детали. При ХГН наблюдается локальное воздействие на определенный участок поверхности, что позволяет визуально контролировать геометрические размеры детали и способствует сохранению структуры материала [17].

На рис. 1 представлен внешний вид экспериментальных образцов кронштейнов из сплава ВАС-1, изготовленных с помощью аддитивной технологии, с дефектами типа «скол» и трещина». В данном случае глубина трещины позволила напылить порошковый алюминий без предварительной обработки фрезерованием. Скол на кромке кронштейна был заполнен алюминием с выравнивающей обработкой фрезерованием и последующей пескоструйной обработкой для уплотнения структуры покрытия.

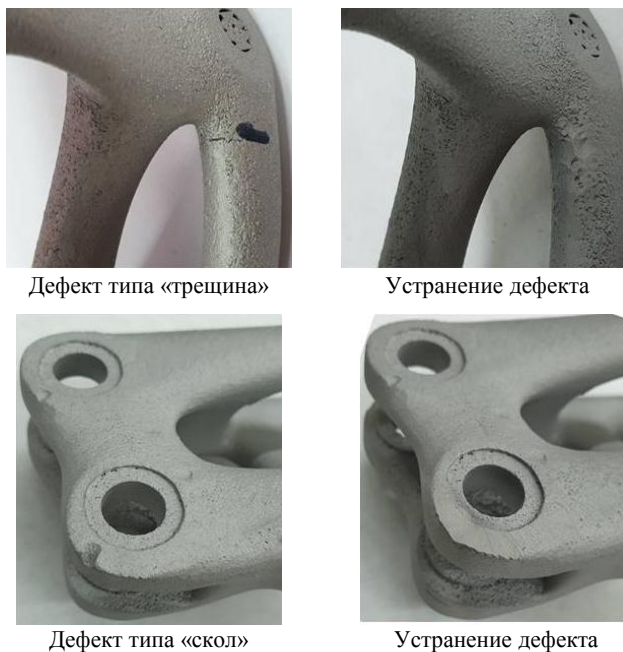


Рис. 1. Внешний вид деталей из сплава ВАС-1 с устраненными методом холодного газодинамического напыления дефектами

Частицы, образовавшие адгезионную связь на поверхности детали, при напылении подвергаются дальнейшему воздействию – соударению со стороны следом летящих частиц. При этом часть кинетической энергии переходит в тепловую. Однако тепло с поверхности восстанавливаемого участка быстро отводится благодаря высокой теплопроводности большинства металлов, а также при помощи потока воздуха [18].

Повысить однородность напыляемого состава возможно за счет порошковых материалов, представляющих собой пластичную матрицу, содержащую армирующие абразивные частицы (корунд). Данное сочетание способствует существенному повышению прочности напыляемого материала и снижению его пористости. Для предотвращения контактной коррозии (из-за возникновения разности электрохимических потенциалов), а также для устранения дефектов и ремонта деталей из сплава ВАС-1 применяется порошок алюминия 99%-ной чистоты с добавками корунда.

Помимо металлического алюминия, порошковый материал для ХГН-покрытий дополнительно содержит частицы корунда дисперсностью от 30 до 100 мкм (рис. 2).

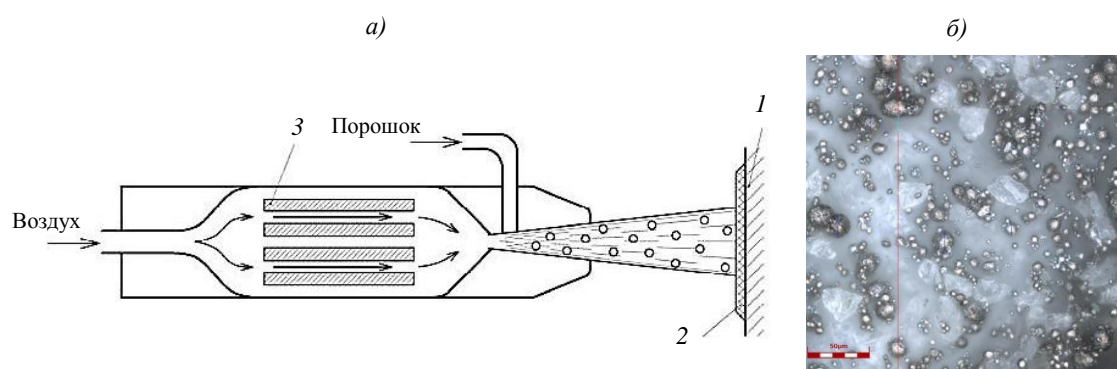


Рис. 2. Схема напылительного блока (а: восстанавливаемая деталь (1), покрытие (2), нагревательные элементы (3)) для нанесения ХГН-покрытий и структура порошкового материала на основе алюминия (б)

Частицы корунда, необходимые для формирования покрытий методом ХГН, выполняют сразу несколько важных функций:

- создают необходимую шероховатость поверхности детали для увеличения адгезионной прочности покрытий;
- способствуют уплотнению и снижению пористости формируемых ХГН-покрытий, что позволяет повысить их защитную способность и коррозионную стойкость;
- являются абразивным материалом, препятствующим спеканию металлических материалов в сопле при напылении ХГН-покрытий.

Однако частицы корунда не только способствуют уплотнению формируемого ХГН-покрытия, но и приводят к его эрозионному износу. На рис. 3 показана схема возникновения дефекта ХГН-покрытия при заполнении пор в металлических материалах.

Часто размеры или конфигурация дефектов детали не позволяют провести ее качественное восстановление методом ХГН.

На рис. 4 представлен фрагмент кронштейна из сплава ВАС-1, изготовленного методом селективного лазерного сплавления.

Образование «воздушной подушки» на дне трещины не позволит провести качественное заполнение дефекта поверхности. На рис. 5 схематично представлен процесс восстановления детали с подобным дефектом.

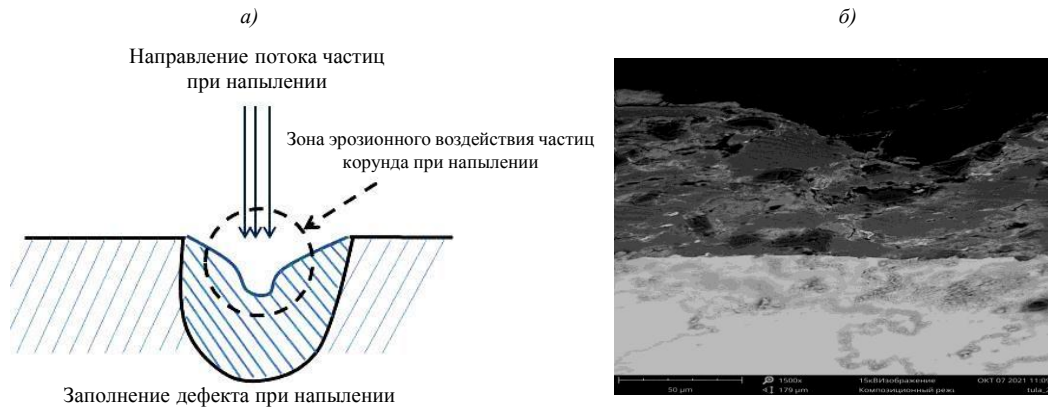


Рис. 3. Схема формирования ХГН-покрытия на участке детали с дефектом (а) и микроструктура ХГН-покрытия с участком эрозионного воздействия корунда (б)

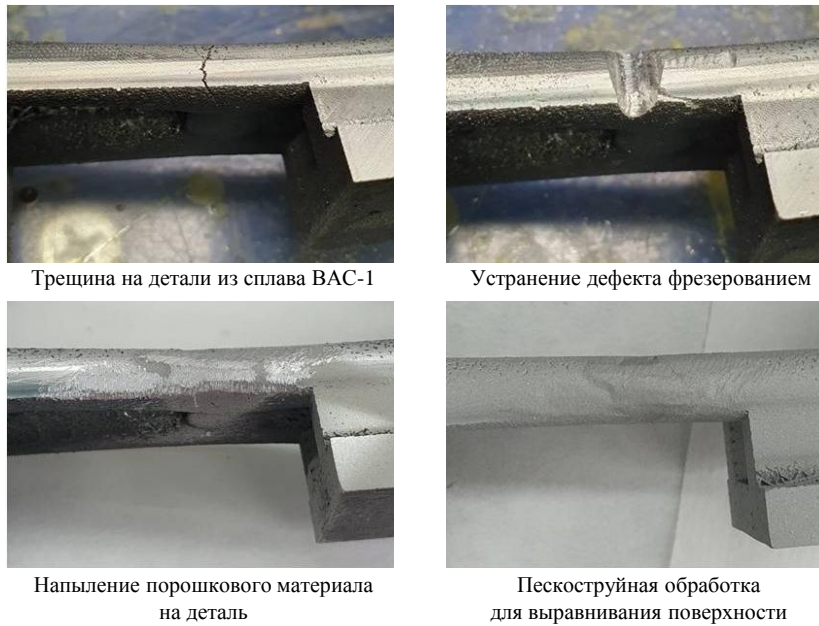


Рис. 4. Поэтапное устранение трещины на кронштейне из сплава ВАС-1

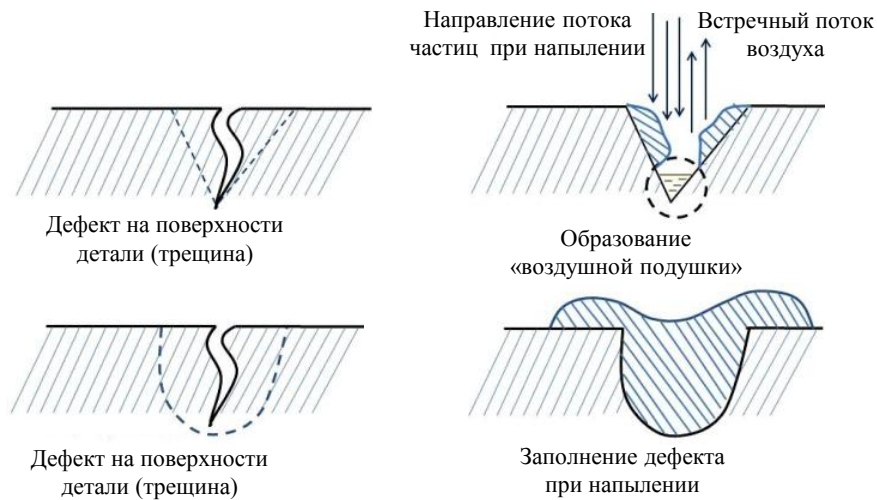


Рис. 5. Схема процесса восстановления детали с трещиной при помощи холодного газодинамического напыления

Подготовка поверхности участка детали с дефектом к восстановлению методом ХГН заключается в придании правильной геометрической формы дефекту и удалении следов царапин и сколов с помощью обработки фрезерованием. На этапе фрезерования очень важно максимально внимательно обработать поврежденный участок для предотвращения дальнейшего распространения трещин в структуре детали. Для удаления маслянистых загрязнений целесообразно использовать неполярный растворитель (толуол, бензин), а затем раствор поверхностно-активного вещества. Далее провести промывку водой и сушку. Для придания большей адгезионной прочности и повышения эффективности расходования порошковых материалов при восстановлении детали необходимо на ее поврежденном участке провести пескоструйную обработку корундовым порошком марок F120 или F230 для создания микрошероховатостей и удаления образовавшихся оксидных пленок. Восстановление участка с дефектом следует проводить не позднее, чем через 4 ч после окончания подготовительных операций [19].

Предварительная пескоструйная обработка поверхности основного материала способствует повышению адгезионной прочности ХГН-покрытий вследствие увеличения диффузии атомов, входящих в его структуру. Адгезионную прочность покрытия можно повысить диффузионным прогревом детали, режим которого подбирается для каждого конкретного сплава отдельно [20].

Пескоструйная обработка создает также сжимающие напряжения в покрытии, повышая усталостную долговечность деталей. Поэтому ее целесообразно проводить и после завершения нанесения ХГН-покрытий.

Наиболее эффективное заполнение дефекта порошком на основе алюминия происходит при температуре от 100 до 150 °С и давлении от 4 до 5 бар (0,4–0,5 МПа). При повышении скорости потока наблюдается образование «воздушной подушки» не только в глубине трещины, но и на значительной площади заполняемой полости. Увеличение температуры воздушного потока нецелесообразно, так как способствует размягчению формирующегося покрытия и снижению эффективности напыления за счет уменьшения пластической деформации напыляемых частиц. Происходит образование структуры, состоящей из оплавленных частиц. В этом случае также наблюдается повышенное содержание частиц корунда в структуре покрытий, что может привести к ухудшению механических свойств детали за счет создания многочисленных концентраторов напряжений в покрытии (рис. 6).

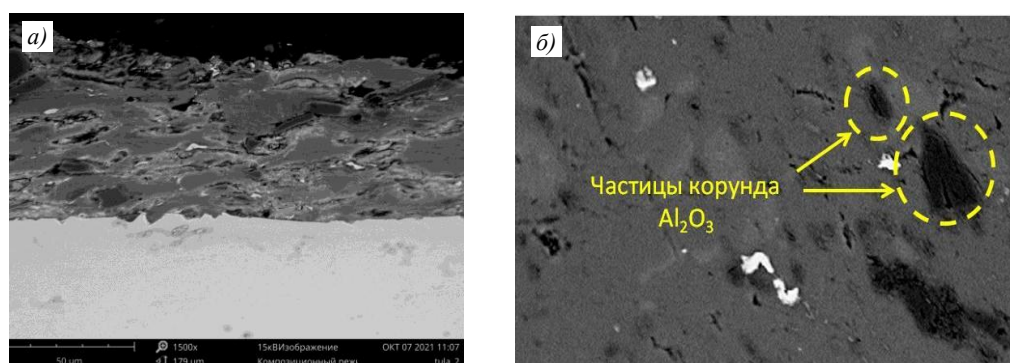


Рис. 6. Структура ХГН-покрытий при повышении температуры воздушного потока при напылении: *a* – микрошлиф покрытия на основе алюминия; *б* – участок покрытия с включениями корунда

Для наиболее эффективного расходования порошкового материала при ремонте деталей из алюминиевых сплавов, а также создания бездефектных участков покрытий

необходимо поэтапное заполнение дефекта порошковым материалом при обязательном фрезеровании с целью устранения возможности дальнейшего роста и распространения трещин в структуре детали.

На рис. 7 представлена схема реализации процесса восстановления дефектов.

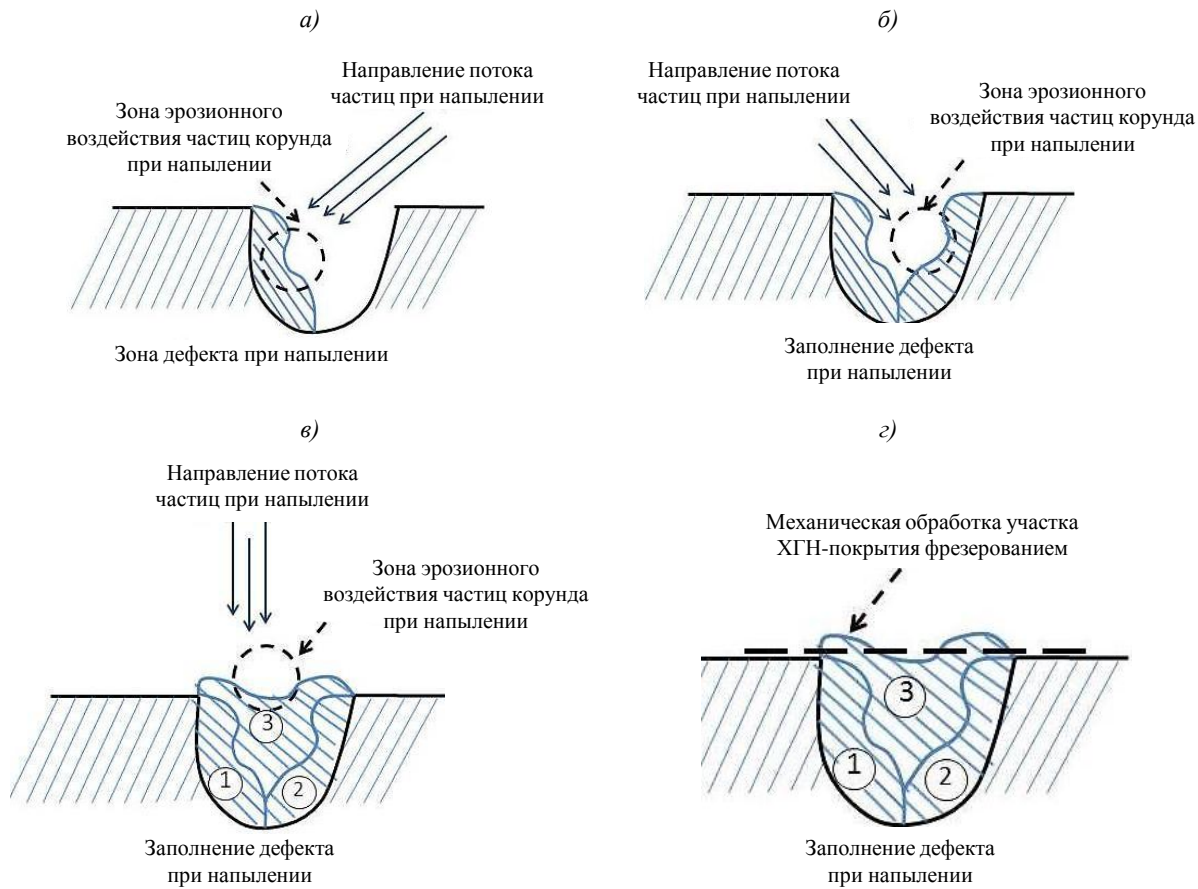


Рис. 7. Схема реализации процесса устранения дефекта: начальный (а), второй (б) и завершающий (в) этапы напыления ХГН-покрытия и механическая обработка его участка (г)

При поэтапном заполнении дефекта порошком алюминия также наблюдается зона эрозионного воздействия частиц корунда, в связи с чем заполнение дефекта производят с запасом под механическую обработку фрезерованием с последующей выравнивающей пескоструйной обработкой (рис. 8).

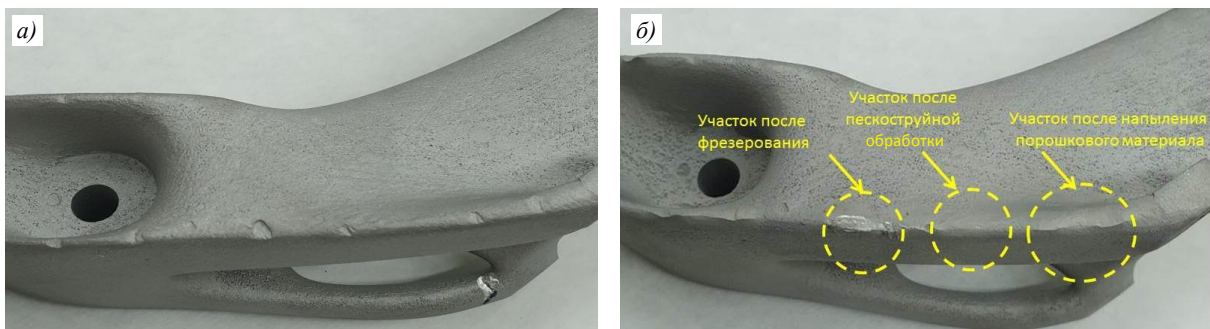


Рис. 8. Внешний вид детали «Кронштейн» из сплава ВАС-1: а – исходное состояние; б – этапы устранения дефектов

Таким образом, при помощи метода ХГН возможно осуществлять локальное восстановление эксплуатационных дефектов деталей, в частности из алюминиевых сплавов, варьируя направление, скорость и температуру воздушного потока при напылении порошкового материала.

При попадании частиц с высокой кинетической энергией на неровность или выступ поверхности в момент соударения возможно их кратковременное плавление, сопровождающееся микросваркой.

Соприкосновение кристаллических решеток частиц и подложки способствует образованию металлических связей, особенно у однородных металлических материалов, что объясняет высокие значения адгезионной прочности напыляемых ХГН-покрытий.

Заключения

Холодное газодинамическое напыление порошковых материалов можно применять не только как альтернативу гальваническим покрытиям для защиты от коррозии, но и в качестве ремонтной технологии деталей и узлов машин с целью восстановления трещин, сколов и прочих дефектов. Данный метод позволяет формировать многофункциональные и многокомпонентные покрытия, как тонкопленочные, так и покрытия толщиной >1 мм, обладающие высокой адгезией к подложке. Оборудование для реализации метода ХГН может быть существенно модернизировано с целью автоматизации процессов, повышения экологической безопасности и производительности.

При использовании метода селективного лазерного сплавления возможно получение готовых деталей с их последующей минимальной механической обработкой, что значительно повышает прочностные свойства изделия и позволяет существенно экономить металлические материалы. Наибольшие перспективы применения у данной технологии – в аэрокосмической технике, где широкое распространение получили алюминиевые сплавы. В условиях эксплуатации нагруженных деталей возможно возникновение дефектов в виде сколов или трещин. Преимущество технологии восстановления дефектов методом ХГН заключается в отсутствии вредных и агрессивных газов, окисления металлических частиц и подложки, а также в технологической простоте нанесения покрытий за счет компактности установки.

При устранении дефекта отсутствуют влияние высокой температуры на деталь и, как следствие, деформация изделия, а также возникновение внутренних напряжений и структурных превращений металла. Метод может быть использован для локального устранения дефектов деталей из алюминиевых сплавов, в том числе сплавов состава AlSi10Mg для изготовления деталей методом селективного лазерного сплавления.

Работы (исследования) выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки России (Соглашение № 075-11-2021-085).

Список источников

1. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // Интеллект и технологии. 2015. № 2 (11). С. 52–55.
2. Рябов Д.К., Антипов В.В., Королев В.А., Медведев П.Н. Влияние технологических факторов на структуру и свойства силумина, полученного с использованием технологии селективного лазерного синтеза // Авиационные материалы и технологии. 2016. № S1. С. 44–51. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-44-51.
3. Рябов Д.К., Морозова Л.В., Королев В.А., Иванова А.О. Изменение механических свойств сплава АК9ч, полученного по технологии селективного лазерного сплавления // Труды ВИАМ. 2016. № 9 (45). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-2-2.

4. Sercombe T., Schaffer G. Rapid manufacturing of aluminum components // *Science*. 2003. Vol. 301 (5637). P. 1225–1227.
5. Bremen S., Meiners W., Diatlov A. Selective Laser Melting // *Laser Technic Journal*. 2012. Vol. 9 (2). P. 33–38.
6. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. № 5. С. 8–18.
7. Иванова А.О., Рябов Д.К., Антипов В.В., Пахомкин С.И. Возможность применения программного комплекса Thermo-Calc для определения параметров термической обработки сплава 1913 и температур атомизации алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № S1 (43). С. 52–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-52-59.
8. Акоюн Т.К., Золоторевский В.С., Хван А.В. Расчет фазовых диаграмм систем Al–Cu–Zn–Mg и Al–Cu–Zn–Mg–Fe–Si // *Цветная металлургия*. 2013. № 3. С. 44–51.
9. Иванова А.О., Вахромов Р.О., Григорьев М.В., Сенаторова О.Г. Исследование влияния малых добавок серебра на структуру и свойства ресурсных сплавов системы Al–Cu–Mg // *Труды ВИАМ*. 2014. № 10. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-1-1.
10. 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.
11. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 4. (37). С. 38–52. DOI: 10/18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
12. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
13. Каблов Е.Н., Кутырев А.Е., Вдовин А.И., Козлов И.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование возможности возникновения контактной коррозии в паяных соединениях, используемых в конструкции двигателей авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.05.2022.). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
14. Коновалов В.В., Дубинский С.В., Макаров А.Д., Доценко А.М. Исследование корреляционных зависимостей между механическими свойствами авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 33–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-33-39.
15. Плохих А.И., Сафонов М.Д., Колесников А.Г., Карпучин С.Д. Механизм релаксации межслойных напряжений в многослойных стальных материалах // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 26–32. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-26-32.
16. Курс М.Г., Николаев Е.В., Абрамов Д.В. Натурно-ускоренные испытания металлических и неметаллических материалов: ключевые факторы и специализированные стенды // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 66–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-66-73.
17. Козлов И.А., Лещев К.А., Никифоров А.А., Демин С.А. Холодное газодинамическое напыление покрытий (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 8 (90). Ст. 08. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 08.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93.
18. Косарев В.Ф., Алхимов А.П. Технология, оборудование, инструменты // *Обработка металлов*. 2003. № 3. С. 28–30.
19. Алхимов А.П., Гулидов А.И., Косарев В.Ф., Нестерович Н.И. Особенности деформирования микрочастиц при ударе о твердую преграду // *Прикладная механика и техническая физика*. 2000. Т. 41. № 1. С. 204–209.

20. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. М.: Физматлит, 2010. С. 25–27.

References

1. Kablov E.N. Additive technologies – the dominant of the national technological initiative. *Intellekt i tekhnologii*, 2015, no. 2 (11), pp. 52–55.
2. Ryabov D.K., Antipov V.V., Korolev V.A., Medvedev P.N. Effect of technological factors on structure and properties of Al–Si alloy obtained by selective laser melting. *Aviacionnyye materialy i tekhnologii*, 2016, no. S1, pp. 44–51. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-44-51.
3. Ryabov D.K., Morozova L.V., Korolev V.A., Ivanova A.O. Alternation of mechanical features of alloy AK9ch manufactured by selective laser melting. *Trudy VIAM*, 2016, no. 9, paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 08, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-2-2.
4. Sercombe T., Schaffer G. Rapid manufacturing of aluminum components. *Science*, 2003, vol. 301 (5637), pp. 1225–1227.
5. Bremen S., Meiners W., Diatlov A. Selective Laser Melting. *Laser Technic Journal*, 2012, vol. 9 (2), pp. 33–38.
6. Kablov E.N. What is the future to be made of? Materials of a new generation, technologies for their creation and processing – the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
7. Ivanova A.O., Ryabov D.K., Antipov V.V., Pahomkin S.I. Application of Thermo-Calc software for determination of parameters of heat treatment 1913 alloy and temperatures of gas atomization for aluminium alloys. *Aviacionnyye materialy i tekhnologii*, 2016, no. S1, pp. 52–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-52-59.
8. Akopyan T.K., Zolotarevsky V.S., Khvan A.V. Calculation of phase diagrams of Al–Cu–Zn–Mg and Al–Cu–Zn–Mg–Fe–Si systems. *Tsvetnaya metallurgiya*, 2013, no. 3, pp. 44–51.
9. Ivanova A.O., Vahromov R.O., Grigor'ev M.V., Senatorova O.G. Effect of small additive of silver on structure and properties of Al–Cu–Mg alloys. *Trudy VIAM*, 2014, no. 10, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 08, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-1-1.
10. 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». *Aviacionnyye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
11. Kablov E.N., Startsev O.V. The basic and applied research in the field of corrosion and ageing of materials in natural environments (review). *Aviacionnyye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 4 (37), pp. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
12. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Review of international experience on corrosion and corrosion protection. *Aviacionnyye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 2 (35), pp. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
13. Kablov E.N., Kutyrev A.E., Vdovin A.I., Kozlov I.A., Afanasyev-Khodykin A.N. The research of possibility of galvanic corrosion in brazed connections used in aviation engine construction. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 12, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
14. Aleksandrov D.A., Muboyadzhyan S.A., Lutsenko A.N., Zhuravleva P.L. Hardening of the surface of titanium alloys by ion implantation method and ionic modification. *Aviacionnyye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 33–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-33-39.
15. Plokhikh A.I., Safonov M.D., Kolesnikov A.G., Karpukhin S.D. Mechanism of interlaminar stress relaxation in multilayer steel materials. *Aviacionnyye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 26–32. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-26-32.
16. Kurs M.G., Nikolayev E.V., Abramov D.V. Full-scale and accelerated tests of metallic and non-metallic materials: key factors and specialized stands. *Aviacionnyye materialy i tekhnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 66–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-66-73.

17. Kozlov I.A., Leshchev K.A., Nikiforov A.A., Demin S.A. Cold spray coatings (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 08, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93.
18. Kosarev V.F., Alkhimov A.P. Technology, equipment, tools. *Obrabotka metallov*, 2003, no. 3, pp. 28–30.
19. Alkhimov A.P., Gulidov A.I., Kosarev V.F., Nesterovich N.I. Peculiarities of deformation of microparticles upon impact with a solid barrier. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2000, vol. 41, no. 1, pp. 204–209.
20. Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Fomin V.M. *Cold gas-dynamic spraying. Theory and practice*. Moscow: Fizmatlit, 2010, pp. 25–27.

Информация об авторах

Козлов Илья Андреевич, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Фомина Марина Александровна, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Демин Семен Анатольевич, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бенариеб Ильяс, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Хмелева Ксения Михайловна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ilya A. Kozlov, Deputy Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Marina A. Fomina, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Semyon A. Demin, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ilyas Benarieb, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ksenia M. Khmeleva, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 11.08.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 15.08.2022.

The article was submitted 11.08.2022; approved and accepted for publication after reviewing 15.08.2022.