

Исследование износостойких покрытий на основе карбида вольфрама, наносимых высокоскоростным газопламенным методом HVOF для деталей авиационного назначения

Государственное предприятие «Антонов», г. Киев, Украина

Приведены результаты исследования покрытий для авиационных деталей на основе карбида вольфрама, наносимых высокоскоростным газопламенным методом HVOF на образцы-имитаторы из сталей различных марок и титана в целях замены гальванического процесса хромирования для повышения надежности и долговечности деталей и узлов шасси самолета. Исследования включали в себя испытания на адгезионную прочность сцепления покрытия с основой, металлографический анализ, коррозионные испытания.

Ключевые слова: износостойкие покрытия на основе карбида вольфрама, высокоскоростной газопламенный метод HVOF, испытания на адгезионную прочность, металлографический анализ, коррозионная стойкость.

Введение

Одной из причин выхода из строя деталей и агрегатов самолета является их износ. Причем около 75% случаев выхода из строя узлов трения обусловлены износом именно трибопар. Если учесть, что система управления самолетом, шасси, гидросистема и т. д. – это системы, работающие вследствие перемещения их элементов, то становится понятным важность обеспечения их надежного функционирования.

Повышенный износ деталей в трибопаре в одних случаях нарушает герметичность рабочего пространства, в других – нарушает нормальный режим смазки, в третьих – приводит к потере кинематической точности механизма, что ухудшает управление самолетом и снижает безопасность полета. Износ и повреждение поверхностей снижают сопротивление усталости деталей и могут быть причиной их разрушения даже при незначительных концентраторах напряжений и слишком низких номинальных нагрузках. Повышенный износ нарушает нормальное взаимодействие деталей в узлах, может вызвать значительные дополнительные нагрузки, удары в соединениях и вибрации, стать причиной внезапных разрушений. Заедание и заклинивание деталей может привести к аварийной ситуации. В связи с этим материалы для узлов трения относятся к важнейшим в машиностроении и, в том числе, самолетостроении [1].

Одним из эффективных способов защиты деталей авиационной и ракетно-космической техники от коррозии и износа (в парах трения, при газо- и гидроабразивном износе, усталостном разрушении поверхностных слоев, фреттинг-коррозии, кавитации, коррозионно-механическом износе) являются газотермические порошковые покрытия [2, 3].

Благодаря применению газотермического напыления период между профилактическими осмотрами авиационных газовых турбин увеличился с 4000 до 24000 ч. Так, в двигателях самолетов Boeing содержится 600 деталей с плазменными покрытиями, а в двигателях самолетов Concorde, Airbus, Mirage плазменное напыление используют для защиты 90 узлов [3].

Плазменные покрытия на основе WC со связкой Co или Ni при различном их процентном содержании применяют в «холодной» зоне ГТД ($T < 540^{\circ}\text{C}$). Покрытия на основе WC наносят на такие самолетные детали, как направляющие закрылки, температурные швы авиационного двигателя, уплотнение воздушного компрессора, ротор компрессора, сегменты вентиляционного канала и ребра жесткости, средние опоры вентиляционных лопаток и т. д. Для напыления используют порошки литого сплава WC-12Co, спеченных сплавов WC-12Co и WC-17Co, механической смеси WC-12Co с самофлюсующимся никелевым сплавом и композиционным порошком 80Ni-20Al. Такие покрытия отличаются высокой стойкостью к изнашиванию абразивными частицами и в условиях фреттинг-коррозии, а также имеют высокую прочность сцепления при умеренных температурах [2].

Для защиты от фреттинг-коррозии при температурах до 340°C (статор и воздушная заслонка компрессора, сегменты и ребра жесткости канала вентилятора) применяют плазменное напыление сплавов на основе Cu (алюминиевые бронзы, сплавы Cu-Ni и Cu-Ni-In), Ni-Al, никелевых самофлюсующихся сплавов в смеси с Mo, композиционным порошком и твердыми сплавами [3].

Высокотемпературной фреттинг-коррозии ($T = 540 \dots 840^{\circ}\text{C}$) подвержены воздушные уплотнения, демпферы, опоры внутренних сопел четырех ступеней, лопатки и другие детали турбины. В этом случае применяют плазменные покрытия из сплавов Ni-Al и Co (в том числе с добавкой Y), композиционные порошки Ni-Al, смеси на основе Cr_3C_2 . Эффективными в условиях фреттинг-коррозии являются покрытия гетерогенного типа – твердые включения, равномерно распределенные в более мягкой вязкой матрице [3].

Кроме газовых турбин плазменным напылением упрочняют и другие узлы авиадвигателей. Так, на гнездо подшипников вала ротора агрегата вспомогательного тока из титанового сплава напыляют молибден, на посадочное место подшипника насоса – твердый сплав WC-Co. Долговечность замков вентиляторных лопаток повышают плазменным напылением сплава Cu-Ni, легированного In. Наружный цилиндр переднего колеса шасси самолета упрочняют плазменным покрытием из WC толщиной 0,25 мм (после шлифования) [2].

Обмотки генераторов самолетов работают в условиях термических и механических ударов, сильной вибрации в интервале температур от -60 до $+490^{\circ}\text{C}$. Этим условиям удовлетворяют плазменные покрытия из Al_2O_3 , наносимые на никелированную медную проволоку, используемую для обмоток [3].

Плазменному напылению также подвергают направляющие предкрылков, узлы шасси, хомуты, узлы топливного насоса и другие детали [3].

Покрытия на основе WC, выполняемые высокоскоростным газопламенным методом HVOF, имеют хорошие характеристики по твердости, плотности и адгезии к основе, широко применяются в зарубежном авиастроении и других областях. Для освоения нового оборудования (Micro Jet), приобретенного для нанесения HVOF покрытий, на ГП «Антонов» была выполнена программа работ по нанесению, механической обработке и испытанию износостойких покрытий на основе карбида вольфрама (WC), наносимых высокоскоростным газопламенным методом HVOF на детали-имитаторы узлов шасси из титанового сплава BT22.

Постановка задачи

Основной задачей исследования является отработка режимов нанесения HVOF-покрытий и исследования их физико-механических свойств по сравнению с традиционным гальваническим хромированием.

Освоение технологии напыления износостойких покрытий на основе WC методом HVOF позволит повысить надежность и долговечность деталей и узлов шасси самолета, повысить экологическую безопасность производства путем замены гальванического процесса хромирования.

Был исследован также комплекс характеристик покрытий:

- отработка технологических способов подготовки поверхности материалов основы под напыление, приемов напыления и последующей механической обработки;
- сравнение характеристик хромового гальванического и HVOF-покрытий и оценка их влияния на основу.

Для исследований были выбраны следующие основы материалов:

- 30ХГСА с термообработкой на $\sigma_B=1100...1300$ МПа;
- 30ХГСН2МА-ВД с термообработкой на $\sigma_B=1600...1850$ МПа;
- 03Н18К8М5Т-ВД (ВКС-170ВД) с термообработкой на $\sigma_B=1600...1850$ МПа;
- 13Х15Н4АМ3-Ш с термообработкой на $\sigma_B=1380...1600$ МПа;
- BT22 с термообработкой на $\sigma_B=1100...1300$ МПа.

Из этих материалов были изготовлены образцы на многоцикловую усталостную прочность, трение-износ, фреттингостойкость, коррозионную стойкость, гидравлические испытания в среде гидрожидкости АМГ-10 и газообразного азота (рис. 1). Для нанесения покрытий методом HVOF на образцы применяли порошковые и проволочные материалы:

- WC-Co-Cr марки JK7109 и WC-Co марки JK7117 по ТУ1-165-14 фракция 20...53 мкм, производитель-поставщик – «Kennametal satellite» (ФРГ);
- ВКНА по ТУ14-1-1790-76 фракция – 40 мкм, производитель-поставщик – «Тулачермет» (г. Тула);
- Мо проволока по ТУ 48-19-203-85 (сертификат EN 10204-2.2, EN 10204-3/1) – \varnothing 1,6 мм, поставщик – ООО ТПП «Будавтотранс» (г. Киев).

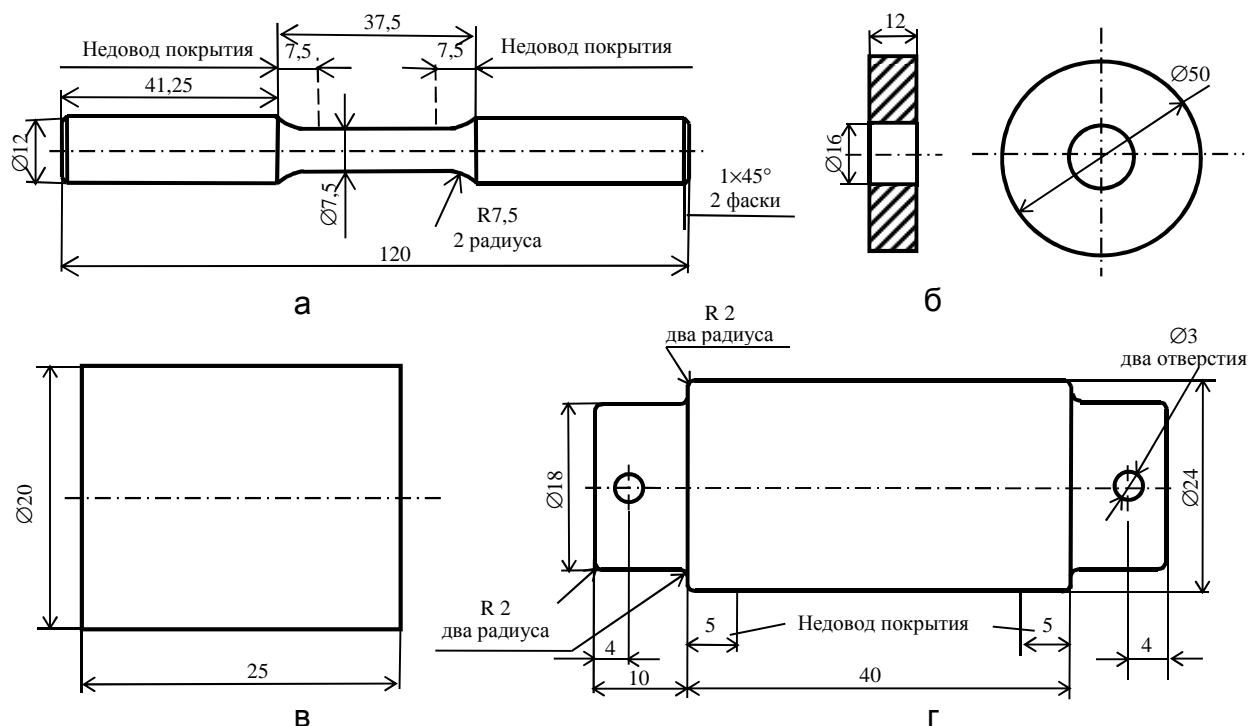


Рис. 1 – Эскизы образцов для испытаний:
 а – на прочность при растяжении материалов основы; б – на трение-износ;
 в – на фреттингостойкость; г – на коррозионную стойкость

Гальваническое хромирование образцов выполнялось толщиной 21...42 мкм и 48...80 мкм, кадмий хлористоамонийный толщиной 6...9 мкм в электролите с хроматной пассивацией и химическое пассивирование по действующим инструкциям.

Металлографические исследования выполняли:

- на образце из ВКС170-ВД размерами 12×6×3 мм с покрытием WC-Co-Cr фракцией 20...53 мкм (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины);
- на образце из стали 30ХГСА размерами 34×10×10 мм с покрытием WC-Co-Cr фракцией 20...40 мкм (образец №1), на образцах из стали 30ХГСН2МА-ВД размерами $\varnothing 25 \times 15$ мм (образец №2) и $\varnothing 25 \times 8$ мм (образец №3) с покрытием WC-Co-Cr фракцией 20...53 мкм (Лаборатория металлографических исследований ЦЗЛ ГП «Антонов»).

Испытания на прочность сцепления покрытия с основой проводили на образцах из высокопрочной стали 30ХГСН2МА-ВД и ВТ22, изготовленных по ГОСТ14760-69 клеевым методом по п. 6.6 ГОСТ 28844-9.

Методика испытаний

Для определения плотности покрытий применяли гидравлические испытания, заключающиеся в приложении избыточного давления через специальный корпус на поверхность покрытия. Контроль герметичности образцов-имитаторов с покрытием осуществляли двумя способами:

- фильтровальной бумагой и визуальным осмотром при подаче гидрожидкости внутрь корпуса под избыточным давлением;

– по появлению пузырьков азота при погружении образца-имитатора в сборе с корпусом, через который подается азот в полость, прилегающую к покрытию, в ванну с жидкостью (гидрожидкость, масло, вода).

Испытания на износостойкость в условиях трения-износа проводились по методике диск-колодка на оборудовании Национального авиационного университета (НАУ) на машине трения СМТ-1.

Испытания на износостойкость в условиях фреттинга проводили по методике ГОСТ 23.211-80 на оборудовании НАУ (машина ФМК-1).

Испытания образцов на коррозионную стойкость будут проводиться в соответствии с ГОСТ 9.308-85 в течение 90 суток:

- в соляном тумане в камере КСТ-1;
- на «коррозионном колесе».

Нанесение покрытий

Покрытия наносили высокоскоростным газопламенным методом HVOF следующими порошковыми и проволочными материалами:

- WC-Co-Cr марки JK7109 и WC-Co марки JK7117 по ТУ1-165-14 фракцией 20...53 мкм;
- ВКНА по ТУ14-1-1790-76 фракцией 40 мкм;
- Мо проволочный по ТУ 48-19-203-85 \varnothing 1,6 мм.

Применяемые газы в баллонах: кислород по ГОСТ 5583-96; метан по ГОСТ 31369-2008; аргон высшего сорта 10157-79; азот по ГОСТ 9293-91. Воздух сжатый по ГОСТ 17433-80 (нулевой или нечетный класс загрязненности).

Режим нанесения HVOF покрытий выбран согласно РТИ 16-639-14.

Для порошковых материалов:

- давление газа P: O₂ – 0,7 МПа, CH₄ – 0,6 МПа;
- расход газа Q_{газа}: O₂ – 100 л/мин, CH₄ – 50 л/мин, Ar (N₂) – 10 л/мин для WC-Co и WC-Co-Cr; O₂ – 75, CH₄ – 50, Ar(N₂) – 15 л/мин для ВКНА;
- расход порошка Q_{пор.} >3 об/мин;
- дистанция напыления L – 150 мм;
- скорость вращения детали ω = 80...125 об/мин (в зависимости от диаметра детали);
- скорость перемещения горелки W=300 мм/мин.

Для проволоки:

- давление газа P: O₂ – 0,7 МПа, CH₄ – 0,6 МПа, воздух – 0,45 МПа;
- расход газа Q_{газа}: O₂ – 100 л/мин, CH₄ – 60 л/мин;
- расход проволоки Q_{пр.} : 80...83 об/мин;
- скорость вращения детали и перемещение горелки такая, как и для напыления порошковых материалов.

Механическая обработка покрытий

Механическую обработку покрытия WC-Co-Cr, нанесенного методом HVOF, выполняли по инструкции ТИ36-49-90 и РТИ16-639-14 на станке ЗБ12 в три этапа:

- чистовое шлифование алмазным кругом АСМ 125/100 СМ1-СМ2 тип 1Ф1 по режимам: скорость вращения круга – 30 м/с, скорость детали – 10...20 м/мин, глубина резания – 0,005...0,01 мм, продольная подача – 0,5...1 мм/оборот детали;

– тонкое шлифование эльборовым кругом марки ЛКВ 125/100 СМ1 К27 тип 1Ф1 по режимам: скорость вращения круга – 35 м/с, скорость детали – 10...20 м/мин, глубина резания – 0,001...0,002 мм, продольная подача – 0,5...1 мм/оборот детали;

– выхаживание эльборовым кругом марки ЛКВ 125/100 СМ1 К27 тип 1Ф1 по режимам: скорость вращения круга – 35 м/с, скорость детали – 10...20 м/мин, продольная подача – 0,5...1 мм/оборот детали.

Испытания на адгезионную прочность

Для определения прочности сцепления покрытий с основой образцы из высокопрочной стали 30ХГСН2МА-ВД и ВТ22 испытывали клеевым методом в соответствии с ГОСТ 28844-90 и ГОСТ 9.304-87. Покрытие наносилось высокоскоростным газопламенным методом HVOF на установке Micro Jet порошковым материалом WC-Co-Cr толщиной 150 мкм, и проволочным материалом Молибден (Мо пр.) толщиной 150 мкм по РТИ 16-639-14. Для склеивания образцов с покрытием и контрольных образцов без покрытия применяли клей ВК-27. Испытания адгезии покрытия из WC-Co-Cr приведены согласно ГОСТ 9.304-87 на разрывной машине ZD10.

Коррозионные испытания

Образцы, изготавливаемые из стали 30ХГСН2МА-ВД с покрытием WC-Co-Cr, и образцы из стали 03Н18К8М5Т-ВД с покрытием WC-Co-Cr, ВКНА, Мо испытывали на коррозионную стойкость в соответствии с ГОСТ 9.308-85 в течение 90 суток:

– в камере КСТ 1 в соляном тумане, содержащем 3% хлористого натрия и 0,1 % перекиси водорода, при температуре 18...25°C. Объем раствора для испытаний составляет 10 см³ на 1 см² поверхности образцов;

– на «коррозионном колесе».

Общая продолжительность испытаний 90 суток. Осмотр образцов проводят через 1, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 75, 90 суток. Состояние образцов оценивали визуально с определением наличия и вида коррозии, размера очагов и их общей площади.

По окончании коррозионных испытаний образцы направляли в ЦЗЛ для металлографических исследований на наличие коррозии в основе.

Результаты исследований

Механическую обработку покрытия WC-Co-Cr выполняли на образцах диаметром 40f7 после обработки режимов механической обработки. Значения шероховатости после механической обработки приведены в табл. 1. Испытания показали результаты, представленные в табл. 2.

Таблица 1

Шероховатость покрытия WC-Co-Cr после механической обработки

№ п/п	Шероховатость поверхности на $\varnothing 40f7$ по Ra	Необходимая шероховатость по Ra
1	0,14...0,17	0,1
2	0,12...0,16	0,1
3	0,13...0,22	0,1
4	0,13...0,18	0,1

Таблица 2

Значение прочности сцепления с основой покрытия WC-Co-Cr и Mo пр.

Номер образца	Вид покрытия	Прочность сцепления, МПа	Требования РТИ16-14 по адгезии покрытия к основе, МПа
к1	Без покрытия.	51,4	-
к2	Оценка клея ВК27	45,3	-
1	WC-Co-Cr	44,9	≥40
2	WC-Co-Cr	49,8	
3	WC-Co-Cr	48,2	
4	WC-Co-Cr	36,7*	
5	WC-Co-Cr	35,9*	
6	WC-Co-Cr	38,9*	
7	Mo пр.	40,8	
8	Mo пр.	45,3	
9	Mo пр.	47,1	
10	Mo пр.	38,6*	
11	Mo пр.	32,2*	
12	Mo пр.	33,7*	

Примечание. *разрушение происходило по клею, без отрыва от основы.

Металлографический анализ

Металлографические исследования проводили на микроскопе НЕОРНОТ-32 при увеличении $\times 100 \dots 500$. Исследовали пористость и микротвердость покрытий. Микротвердость покрытия замеряли при нагрузках $P=50$ г, $P=100$ г на МПТ-3 по ГОСТ 9450-76. Оценку пористости покрытия выполняли методом сравнения с эталонами.

Металлографические исследования образцов с покрытием проводили в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

На рис. 2 показана мелкодисперсная микроструктура покрытия без включений, содержание пор и выкрашиваний в покрытии не более 3...4%, толщина 400 мкм.

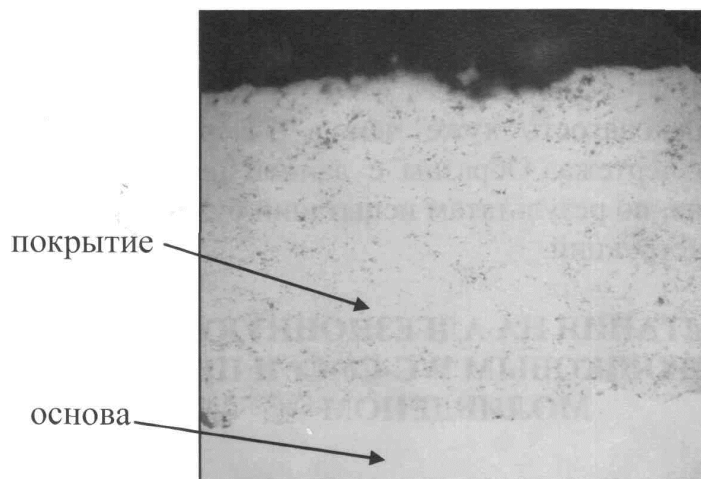


Рис. 2 – Микроструктура покрытия WC-Co-Cr, нанесенного методом HVOF на сталь ВКС170-ВД с термообработкой на $\sigma_b=1600...1850$ МПа без последующей механической обработки покрытия

В лаборатории металлографических исследований ГП «Антонов» исследовали образцы № 1 – 3. Микроструктуры образцов показаны на рис. 3 – 6. Структура покрытия образца № 1 менее плотная, чем у образцов № 2, № 3, и пористость его соответственно выше (рис. 4, 6). Наблюдаются перепады значения микротвердости покрытия на образце № 1, а толщина его в отличие от образцов № 2 и № 3 менее равномерна.

Сводные результаты исследований покрытий приведены в табл. 3.

Для сравнения: гальванический хром имеет твердость 8000...10000 МПа, толщину 48...80 мкм.

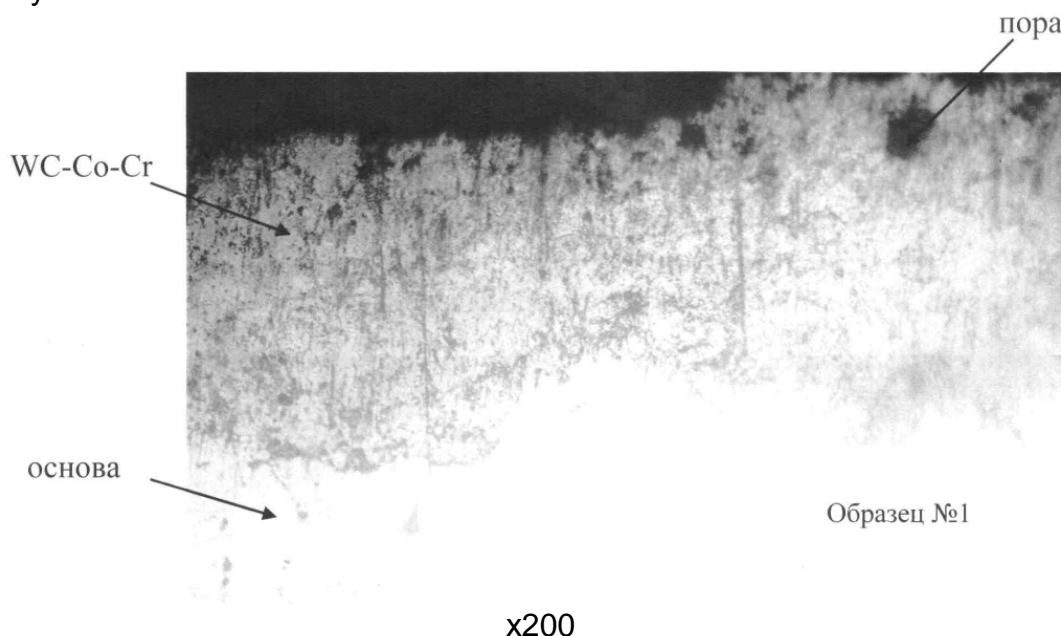


Рис. 3 – Микроструктура покрытия WC-Co-Cr, нанесенного методом HVOF на сталь 30ХГСА с термообработкой на $\sigma_b = 1100...1300$ МПа без последующей механической обработки покрытия

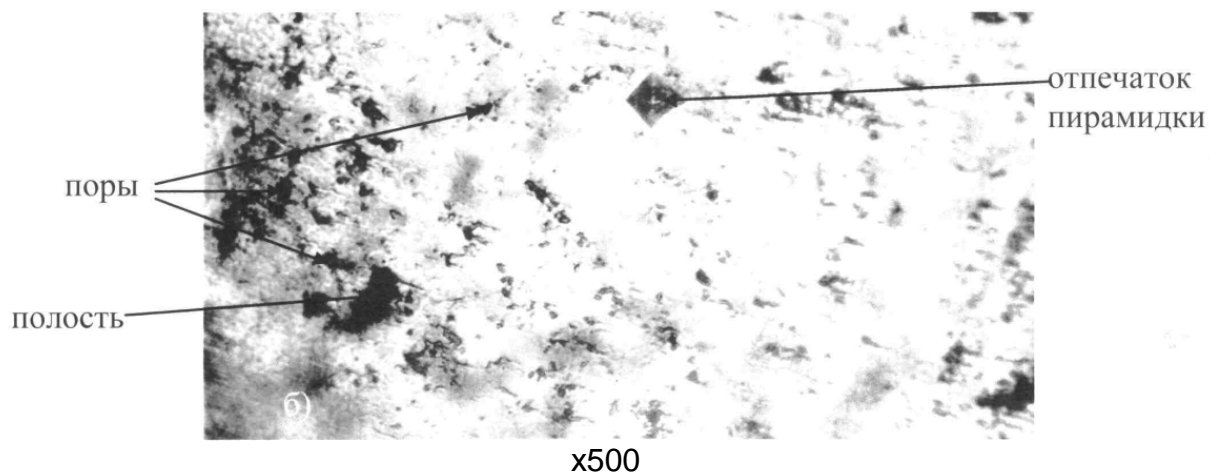


Рис. 4 – Микроструктура покрытия WC-Co-Cr, нанесенного на плоский образец из стали 30ХГСА без последующей механической обработки покрытия

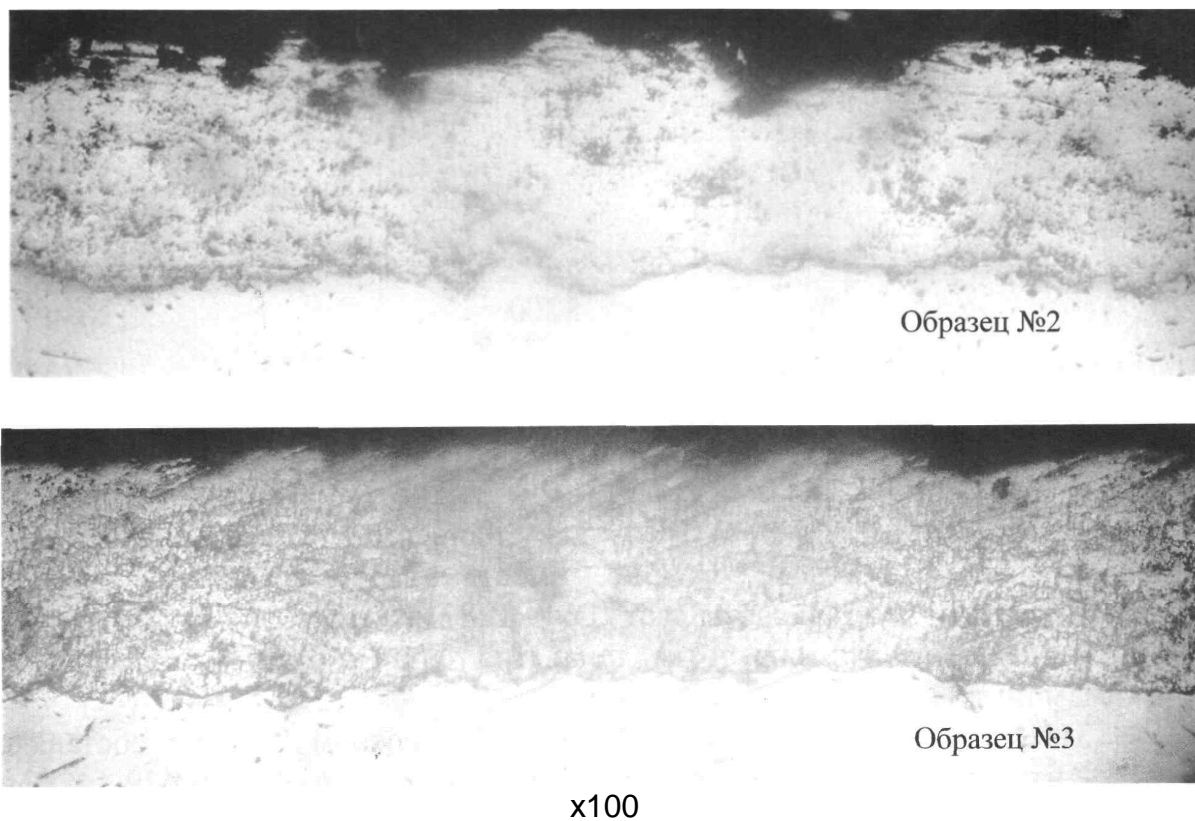


Рис. 5 – Микроструктура покрытия, нанесенного методом HVOF на сталь 30ХГСН2МА-ВД с термообработкой на $\sigma_{\text{в}} = 1600 \dots 1850$ МПа с последующей механической обработкой покрытия (шлифованием)

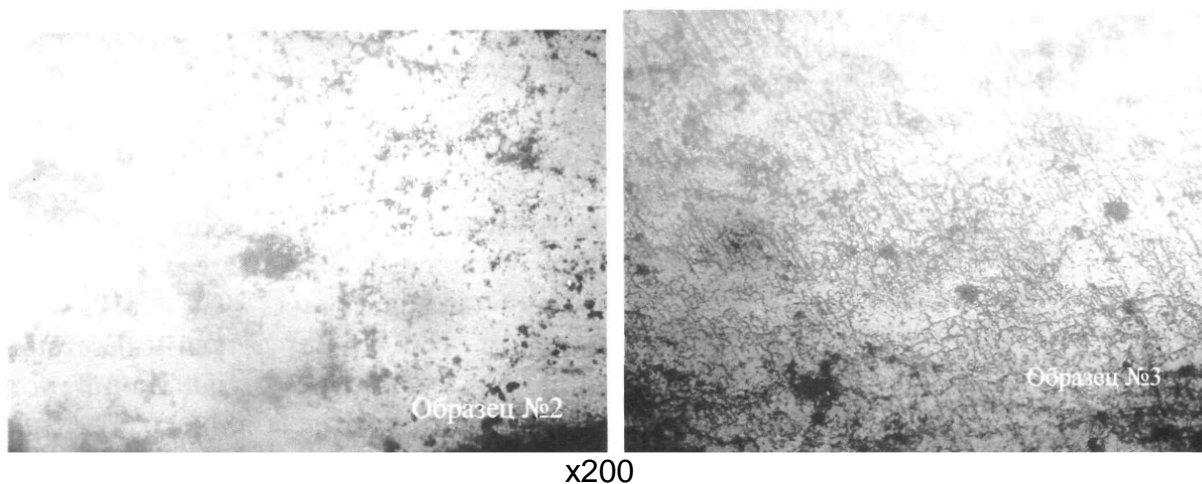


Рис. 6 – Микроструктура покрытия WC-Co-Cr, нанесенного методом HVOF на цилиндрические образцы из стали 30XCH2MA-BД

Таблица 3

Результаты исследований свойств покрытия WC-Co-Cr

Номер образца	Материал покрытия	Микротвердость покрытия, МПа	Нагрузка при измерениях Р, г	Пористость покрытия, %	Толщина покрытия, мкм
1	WC-Co-Cr	10640...12870	100	4	60...250
2		12000	50	1...2	200...325
3		12000	50	0,5...1	275...350

Выводы

1. Покрытие из WC-Co-Cr, наносимое высокоскоростным газопламенным методом HVOF, имеет твердость выше, чем у гальванического хрома, и составляет 10640...12870 МПа.

2. Механическая обработка покрытия WC-Co-Cr по отработанным режимам позволяет получить шероховатость $0,1 < Ra < 0,2$.

3. Пористость покрытия WC-Co-Cr на плоском образце составляет 4%, что не соответствует требованиям, а на цилиндрических образцах – 0,5...2%, что соответствует требованиям инструкции. Это связано с тем, что процесс нанесения покрытий на цилиндрическую поверхность проводится в «полуавтоматическом режиме» – на токарном станке с точным соблюдением параметров нанесения покрытий (подача горелки, скорость вращения детали, расстояние от сопла до поверхности). При напылении на плоский образец вышеуказанные параметры соблюдаются с определенной погрешностью, так как процесс выполняют вручную.

4. Для получения равномерного покрытия на плоских поверхностях деталей и деталей сложной конфигурации необходимо автоматизировать процесс нанесения покрытий.

Список литературы

1. Конструкционные материалы в самолетостроении [Текст] / А. Г. Моляр, А. А. Коцюба, А. С. Бычков, О. Ю. Нечипоренко. – К.: КВИЦ, 2015. – 400 с.
2. Порошковые материалы для авиационной и ракетно-космической технической техники [Текст] / А. А. Коцюба, А. С. Бычков, О. Ю. Нечипоренко, И. Г. Лавриненко. – К.: КВИЦ, 2016. – 304 с.
3. Борисов, Ю. С. Плазменные порошковые покрытия [Текст] / Ю. С. Борисов, А.Л. Борисов. – К.: Техніка, 1986. – 223 с.

Поступила в редакцию 15.03.2017.

Дослідження зносостійких покриттів на основі карбиду вольфраму, що наносяться високошвидкісним газополуменевим методом HVOF для деталей авіаційного призначення

Наведено результати дослідження покриттів для авіаційних деталей на основі карбиду вольфраму, що наносяться високошвидкісним газополуменевим методом HVOF на зразки-імітатори зі сталей різних марок і титану з метою заміни гальванічного процесу хромування для підвищення надійності й довговічності деталей і вузлів шасі літака. Дослідження містили випробування на адгезійну міцність зчеплення покриття з основою, металографічний аналіз, корозійні випробування.

Ключові слова: зносостійкі покриття на основі карбиду вольфраму, високошвидкісний газополуменевий метод HVOF, випробування на адгезійну міцність, металографічний аналіз, корозійна стійкість.

Investigation of Wear-Resistant Coatings Based on Tungsten Carbide, Applied by High-Speed Gas-Flame Method HVOF for Aviation Parts

The results of a study of coatings for aviation parts based on tungsten carbide applied by the high-speed gas-flame method of HVOF on imitation specimens from steels of various grades and titanium with the purpose of replacing the galvanic chromium process for improving the reliability and durability of the parts and components of the airplane chassis are presented. The studies included tests on adhesion strength of coating with the substrate, metallographic analysis, corrosion tests.

Keywords: wear-resistant coatings based on tungsten carbide, high-speed gas-flame method HVOF, adhesion strength tests, metallographic analysis, corrosion resistance.

Сведения об авторах

Бычков Андрей Сергеевич – Государственный научно-исследовательский экспертно-криминалистический центр МВД Украины, г. Киев, Украина

Коцюба Александр Анатольевич – Президент Государственного предприятия «Антонов», г. Киев, Украина.

Потягов Валерий Юрьевич – инженер-технолог, Государственное предприятие «Антонов», г. Киев, Украина.