

УДК 669.245.018.044:620.193.53

А.А. КРАВЕЦ, Е.И. ГОРДИЕНКО, О.А. КОРОГОД, В.Г. ПРОЧАН

*Государственное предприятие Запорожское машиностроительное конструкторское бюро
«Прогресс» им. академика А.Г.Ивченко, Украина*

ПОЛУЧЕНИЕ ПРИРАБАТЫВАЕМОГО ЖАРСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ НА ПРОСТАВКАХ ТК МЕТОДОМ HVOF

В настоящей статье рассмотрено получение прирабатываемого жаростойкого покрытия $CoNiCrAlY$ методом высокоскоростного газопламенного напыления HVOF на проточной поверхности проставки турбины компрессора (ТК) газотурбинного двигателя. Рассмотрены преимущества данного способа нанесения покрытий по сравнению с другими методами газотермического напыления. Изучены особенности микроструктуры полученного покрытия и такие основные характеристики, как твердость и жаростойкость, обеспечивающие его работоспособность до $1040^\circ C$. Проведены испытания, подтверждающие высокий уровень свойств полученного покрытия.

Ключевые слова: жаростойкие покрытия, высокоскоростное газопламенное напыление, твердость, микроструктура, термоциклирование, проставка.

1. Введение

В настоящее время актуальной задачей является поиск новых способов нанесения покрытий на детали газотурбинных двигателей. Одним из таких методов является высокоскоростное газопламенное нанесение HVOF. Преимуществами высокоскоростного газо-пламенного метода по сравнению с другими методами газотермического напыления являются достаточно высокая скорость частиц (до 750 м/с) и минимальная пористость получаемого покрытия (1 – 4%) [1,2]. На нашем предприятии используется оборудование HV-50 фирмы Flame Spray Technologies для нанесения покрытий методом HVOF с пистолетом JP-5000 (Tafa-Praxair, USA). Внешний вид устройства приведен на рисунке 1.

В сверхзвуковой распылительной системе JP-5000 используются простые и эффективные решения для создания высокого давления в камере сгорания и получения покрытий высокого качества.

Преимущества покрытий:

- высокая и регулируемая плотность покрытий;
- высокая и регулируемая твердость покрытия;
- высокая адгезия;
- получение покрытия толщиной более 12,7 мм.

Кроме того, у JP-5000 время напыления в четыре раза меньше, чем у обычных систем HVOF. Такое резкое увеличение скорости распыления и производительности JP-5000 определяет его в новую категорию оборудования HVOF: сверхзвуковое распыление высокого давления. (HP/HVOF) [3].

Система JP-5000 включает в себя пистолет, пульт управления и порошковый питатель. Каждый элемент оптимизирован, для получения высококачественных надежных и повторяемых покрытий.

Пистолет JP-5000 является сердцем системы. Большие инженерные усилия были направлены на разработку и тестирование данного устройства. Результатом является уникальная конструкция, которая обеспечивает значительно более качественное покрытие. Главный момент в конструкции, это радиальная подача порошка. Порошок вводят за соплом сгорания. Подача порошка в эту область более низкого давления способствует лучшему перемешиванию порошка, более равномерному нагреву, меньшему окислению и высоким скоростям частиц. Частицы имеют более низкую кинетическую энергию, но равномерно распределенную температуру по сравнению с другими орудиями HVOF [4,5].



Рис. 1. Внешний вид устройства JP-5000

Уникальная конструкция JP-5000 генерирует высокое давление сгорания до 8,2 Бар (против 2-4 Бар в других HVOF) и превосходную ско-

рость газа 2,190 м/сек (против 1,460-1,800 м/с в других). Это приводит к более высокой твердости и плотности покрытий [6].

Эти конструктивные особенности позволяют использовать порошки большего гранулометрического размера. В большинстве случаев это позволит снизить стоимость порошков. Основное преимущество более крупных частиц, в том что они имеют меньшую площадь поверхности, что снижает окисление и уменьшает уровень кислорода в покрытии. Эффективное водяное охлаждение позволяет работать в течение длительного периода. В отличие от некоторых HVOF температура охлаждающей воды не является критическим фактором качества покрытия.

JP-5000 — это экономичное устройство, которое работает на керосине или эквивалентном топливе.

При использовании данной системы можно выделить такие способы экономии денег: затраты на топливо ниже, так как керосин, как правило, доступнее и по ценам ниже пропилена или водорода. Скорость распыления JP-5000 может быть увеличена до 9,1 кг в час, таким образом, вы нанесете больше покрытия за меньшее время. Важно отметить, что на качество покрытия не влияют более высокие темпы распыления. Типичная эффективность осаждения в размере 0,025 мм за один проход более чем в два раза выше, чем у других систем HVOF. Это обеспечивает проработку большего количества деталей, при меньших трудозатратах [7].

Типичные материалы, применяемые при напылении — порошки карбидов, MeCrAlY, сплавы никеля и железа [8].

2. Формулирование проблемы

Актуальной задачей является получения металлических покрытий MeCrAlY с помощью высокоскоростного напыления, которые наносятся на проточные поверхности проставок ТК газотурбинных двигателей из сплава ЭП648-ВИ для обеспечения их жаростойкости и достаточной прирабатываемости. Одним из важных преимуществ технологии является формирование в получаемых покрытиях напряжений растяжения, что позволяет получать более толстые покрытия, чем при других технологиях напыления.

3. Материалы исследования и его результаты

На нашем предприятии отработана технология нанесения покрытия системы CoNiCrAlY на проставки ТК. Химический состав порошка: Ni 32.0%, Cr 21.0%, Al 8.0%, Y 1.0%, Co основа.

Это покрытие обеспечивает защиту деталей от окисления при работе до 1040 °С. Одними из главных характеристик, обеспечивающих работоспособность данного покрытия, являются регламентированная твердость и высокая адгезия с подложкой, что обусловлено способом его нанесения.

При металлографическом исследовании микроструктуры покрытия CoNiCrAlY установлено, что непосредственно после нанесения в покрытии наблюдаются четкие границы расплавленного исходного порошка (гранул), имеются мелкие поры, которые расположены по границам гранул покрытия.

Необходимым условием для получения оптимальной структуры и свойств является проведение отжига покрытия [9]. Были опробованы несколько режимов отжига (на воздухе) и выбран оптимальный, обеспечивающий необходимые свойства покрытия CoNiCrAlY: $T = 900$ °С в течение 6 часов. В микроструктуре покрытия после отжига происходит выделение глобулярных структурных составляющих, равномерно расположенных по всей толщине покрытия. Границы между гранулами расплавленного исходного порошка размыты. При этом в результате взаимной диффузии элементов на границе раздела «металл — покрытие» формируется промежуточный слой — диффузионная зона, обеспечивающая прочное сцепление покрытия с основой.

Микроструктура покрытия до и после отжига представлена на рисунках 2, 3.

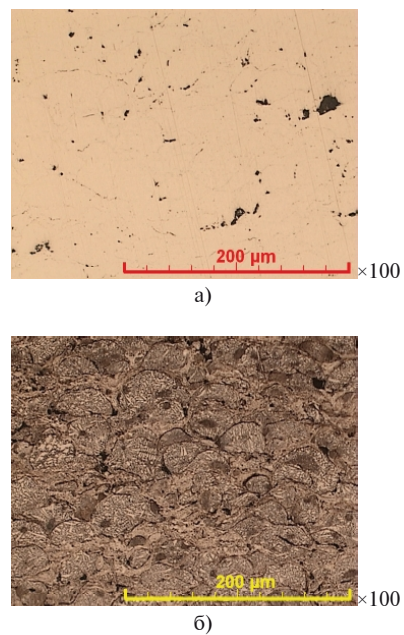


Рис. 2. Микроструктура покрытия CoNiCrAlY до отжига: а — поры в микроструктуре покрытия CoNiCrAlY без травления; б — после травления в растворе щавелевой кислоты

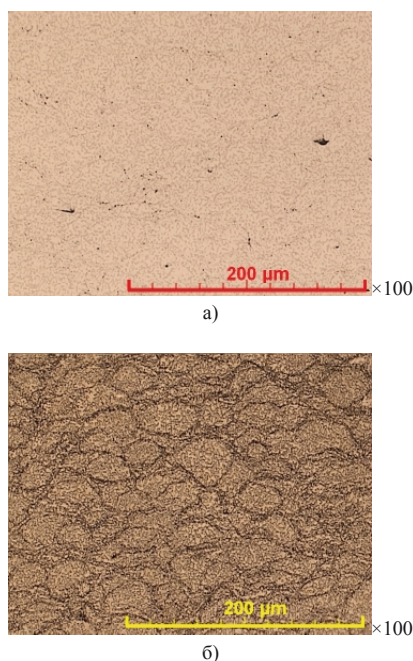


Рис. 3. Микроструктура покрытия CoNiCrAlY после отжига: а – без травления; б – после травления в растворе щавелевой кислоты

Следует отметить, что микроструктура покрытия по всей его толщине однородная и представляет собой твердый раствор, упрочненный глобулярными выделениями. Микроструктура покрытия приведена на рисунке 4.

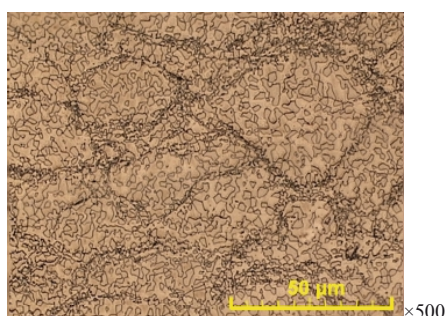


Рис. 4. Микроструктура покрытия CoNiCrAlY после отжига

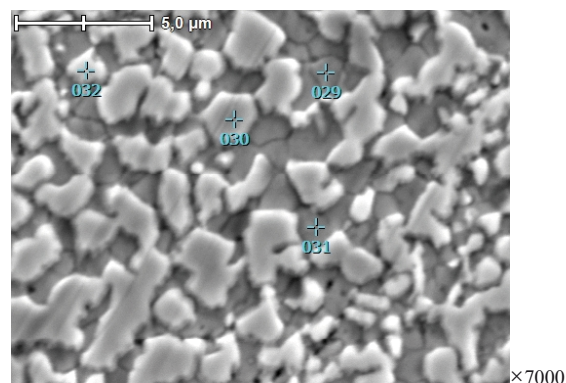
По результатам микрорентгеноспектрального анализа (РСМА) матрица представляет собой твердый раствор на кобальтовой основе. Упрочняющей фазой является интерметаллид типа NiAl (-фаза). Результаты РСМА, проведенного на электронном микроскопе с энергодисперсионным анализатором, приведены на рисунке 5.

На рисунке 6 приведена толщина и микроструктура диффузионной зоны полученного покрытия, образовавшейся при его отжиге.

Твердость покрытия в исходном состоянии после нанесения составляет 490HV. После

термической обработки наблюдается снижение твердости до 370HV.

Согласно ДСТУ 2639-94 были проведены испытания для определения прочности сцепления покрытия с основой. Среднее значение адгезионной прочности покрытия при комнатной температуре, полученного методом высокоскоростного напыления, выше 8,7 кгс/мм², что подтверждено испытаниями клеевых образцов, при чем разрушение на всех образцах произошло по клею.



Покрытие	Массовая доля содержания элементов, %					
	№ точки	Al	Cr	Co	Ni	Y
	29	3,37	25,69	43,37	27,57	
	30	12,91	10,52	27,05	49,52	
	31	1,99	28,72	44,63	24,65	
	32	13,17	8,66	25,31	51,62	1,24

Рис. 5. Приблизительный химический состав структурных составляющих покрытия CoNiCrAlY

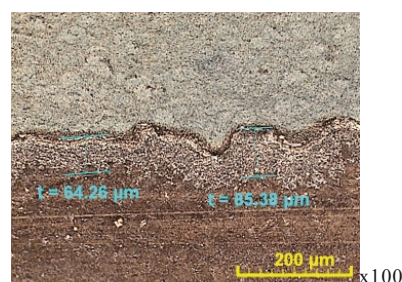


Рис. 6. Толщина и микроструктура диффузионной зоны покрытия CoNiCrAlY: 1 – покрытие CoNiCrAlY; 2 – диффузионная зона; 3 – основной материал образца

Также в условиях нашего предприятия были проведены испытания образцов на стойкость при термоциклических нагрузениях. Параметры одного цикла: T_г = 1100 °С, работа 2 мин и переход на T_г = 700 °С, 2 мин. Время перехода с режима на режим – 5 секунд. В зоне действия горячего потока газов образовались

цвета побежалости. Все образцы выдержали заданное количество циклов без разрушения: сколов и отслоений покрытия не обнаружено. Внешний вид образцов после испытания приведен на рисунке 7.



Рис. 7. Внешний вид поверхности с покрытием CoNiCrAlY после термоциклирования

В настоящее время детали с покрытием CoNiCrAlY проходят сдаточные испытания на двигателе.

4. Выводы

В процессе проведенной работы отработана технология нанесения покрытия системы CoNiCrAlY методом высокоскоростного газопламенного напыления HVOF на проставки ТК газотурбинных двигателей из сплава ЭП648-ВИ для обеспечения их жаростойкости и достаточной прирабатываемости. Проведены испытания на адгезионную прочность и стойкость при термоциклических нагружениях, подтверждающие высокий уровень свойств полученного покрытия.

Литература

1. Харламов Ю. А. Газотермическое напыление покрытий и экологичность производства,

эксплуатации и ремонта машин. // Тяжелое машиностроение. - 2000. - №2. - С. 10–13.

2. Коробов Ю. С. Повышение срока службы деталей сверхзвуковым газопламенным напылением. // Тяжелое машиностроение. - 2006. - №7. С. 34-36.

3. Handbook of Thermal Spray Technology // Ed. by J. R. Davis, ASM International 2004.

4. Thermal Spraying Technology and Its Applications in the Iron & Steel Industry in China / R. L. Hao // Global Coating Solutions: proc. of ITSC 2007. (Ed.) B.R. Marple, May 14–16, 2007 (Beijing, China), ASM International 2007, p. 291-296.

5. Impingement Resistance of HVOF WC-based Coatings / C. Deng et al. Journal of thermal spraying. 5-6 (2007) Vol. 16, - p. 604-609.

6. HVOF-solutions: Информационный бюллетень. // Sulzer Metco – 2008.

7. JP-5000, the HVOF of the 21st century / M. J. Breitsameter, M. Prosperini // 4th HVOF Colloquium at Erding/Munich – Bavaria – Nov 13-14. 1997. – P. 119-125.

8. Praxair surface technologies -TAFE: HP/HVOF equipment solutions. 2009.

9. Verstak A., Baranovski V. Activated Combustion HVOF Coatings for Protection against Wear and High Temperature Corrosion. // Thermal Spray 2003: Advancing the Science and Applying the Technology. Proc. of the ITSC-2003. – 2003. - Vol. 1.

Поступила в редакцию 01.06.2014

А.А. Кравець, О.І. Гордієнко, О.О.Корогод, В.Г.Прочан. Отримання жаростійкого покриття, що стійке до стирання, на проставках ТК (турбіни компресору) методом HVOF

У даній статті розглянено отримання жаростійкого покриття CoNiCrAlY, стійкого до стирання, методом високошвидкісного газопламенного напылення HVOF на проточній поверхні проставки турбіни компресора (ТК) газотурбінного двигуна. Розглянені переваги даного методу нанесення покриттів в зрівнянні з іншими методами газотермічного напылення. Досліджені особливості мікроструктури отриманого покриття та такі основні характеристики, як твердість та жаростійкість, що забезпечують його працездатність до 1040 °С. Проведені випробування, які підтверджують високий рівень властивостей отриманого покриття.

Ключові слова: жаростійке покриття, високошвидкісне газополуменеве напылення, твердість, мікроструктура, термоциклювання, проставка.

A.A.Kravets, O.A.Korogod, E.I.Gordienko, V.G.Prochan. Reception of the abrasible extra heat resisting covering on turbine compressor spacers by HVOF (HIGH VELOCITY OXIGEN FUEL) method

There is considered the process of deposit the abrasible coating CoNiCrAlY, at the working surface of engines frames by high velocity oxigene fuel method (HVOF) and the advantages of this method. The basic characteristics of this coating, such as hardness and temperature-resistant, has been learned. Due to this characteristics the coating gets a capability to work under 1040 °C. The tests of coating have been completed. They have shown high quality of the abrasible extra-heat resisting coating CoNiCrAlY.

Key words: temperature-resistant cover, high-speed gas-flame dusting, hardness, microstructure, thermocycling, spacer.