

УДК 621.762

**В.М. КИСЕЛЬ, Ю.И. ЕВДОКИМЕНКО, В.Х. КАДЫРОВ, Г.А. ФРОЛОВ***Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАНУ, Украина***ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ВОЗДУШНО-ТОПЛИВНОЕ НАПЫЛЕНИЕ –  
СОВРЕМЕННЫЙ МЕТОД НАНЕСЕНИЯ ЖАРО- И ИЗНОСОСТОЙКИХ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ**

Рассмотрены особенности технологии высокоскоростного воздушно-топливного напыления и применения ее для нанесения жаро- и износостойких покрытий из порошков высоколегированных сплавов и твердых сплавов на основе карбидов вольфрама и хрома с металлической связкой. Приведены свойства таких покрытий, нанесенных двухкамерной горелкой «Град-В» (ИПМ НАНУ), а также результаты расчета оптимальных гранулометрических составов металлических порошков в зависимости от их температуры плавления.

**высокоскоростное газопламенное напыление, высокоскоростное воздушно-топливное напыление, жаростойкие износостойкие металлические и композиционные покрытия, свойства покрытий**

Высокоскоростное газопламенное напыление (ВГПН) в кислородно-топливном варианте за последнее десятилетие XX века прочно укоренилось в производстве высокотехнологичных изделий во многих отраслях промышленности, в том числе, в аэрокосмической индустрии [1]. Однако в последние годы все большее внимание привлекает другая разновидность ВГПН – высокоскоростное воздушно-топливное напыление (ВВТН, HVAF-Spraying), суть которого заключается в нагреве и разгоне частиц напыляемого материала потоком продуктов сгорания воздушно-топливной смеси, истекающих под давлением из камеры сгорания (КС) через сопло. Первоначально метод предназначался для нанесения покрытий из относительно легкоплавких металлов – Zn, Al, Cu и их сплавов [2], но уже в конце 90-х годов на экспериментальных установках большой мощности были получены покрытия из суперсплавов и твердых сплавов на основе карбида вольфрама. В настоящее время, после разработки новых схем организации рабочих процессов в камерах сгорания горелок, технология ВВТН позволяет наносить высококачественные покрытия различного назначения на компактном оборудовании, в том числе в ручном режиме. При этом ВВТН превосходит остальные методы газотермического напыления

по производительности и экономической эффективности.

Главной особенностью метода ВВТН, определяющей высокое качество покрытий, является относительно низкая температура газовой фазы потока, позволяющая наносить мелкодисперсные (< 40 мкм) порошки без перегрева частиц и связанных с ним интенсивного окисления и деструкции материалов.

В табл. 1 приведены расчетные температуры продуктов сгорания в воздухе стехиометрических смесей некоторых горючих в характерных сечениях тракта горелки при отсутствии теплообмена на ее стенках и давлении в КС 1,0 МПа, где сечение № 1 – КС перед соплом, № 2 – критическое сечение сопла, № 3 – нижнее по потоку сечение сверхзвукового сопла, № 4 – выходное сечение разгонного канала.

Таблица 1

Температура продуктов сгорания различных горючих в характерных сечениях горелки для ВВТН

Горючее	Температура, К в сечении			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Водород	2355	2160	1600	1740
Пропан	2255	2080	1530	1660
Керосин	2240	2070	1510	1640
Метан	2190	2015	1470	1600

Хотя водород является наиболее термодинамически эффективным горючим газом для горелок, обеспечивая максимальные значения энергетических параметров (удельной энтальпии и кинетической энергии) частиц напыляемого материала, его применение ограничено экономическими соображениями. Промышленные установки ВВТН работают, как правило, на пропане, метане, промышленных газовых смесях (МАРР, МАФ) или керосине.

Из табл. 1 видно, что в воздушно-топливных горелках частицы любых материалов могут быть нагреты до температур порядка 1650 К. Однако предельный размер этих частиц определяется протяженностью зоны нагрева, т.е. размерами горелки, и, соответственно, ее тепловой мощностью, а также эффективностью организации процесса межфазного (газ–частицы) теплообмена в тракте горелки. С учетом, что большинство материалов при температуре  $0,9 T_m$  ( $T_m$  – температура плавления) имеют пластичность, достаточную для формирования покрытия, можно сделать вывод о принципиальной возможности напыления методом ВВТН порошковых материалов с температурой плавления до 1800К. Расчеты показывают, что скорость частиц в выходном сечении ствола горелки с тепловой мощностью, ограниченной возможностью применения ее в качестве ручного инструмента, составляет 500 – 1000 м/с в зависимости от их размера, плотности материала и конфигурации разгонного канала.

В то же время опыт «холодного» газодинамического напыления свидетельствует, что большинство металлов и сплавов даже при нормальной температуре достаточно пластичны для ударного деформирования частиц в процессе их соударения с подложкой и образования прочной связи с ней и между собой. Формирование покрытия происходит только при скоростях соударения, превышающих некоторое критическое значение (650 – 800 м/с в зависимости от материала) [3]. При этих скоростях кинетическая энергия частицы оказывается достаточной для

совершения работы ее пластической деформации при формировании контактной площадки и активации на ней химических связей между атомами материалов частицы и подложки с суммарной энергией, превышающей энергию накопленной при соударении упругой деформации. Отмеченная в [4] зависимость коэффициента использования порошка от температуры частиц указывает на снижение критической скорости напыляемости частиц с увеличением их температуры и подтверждает роль пластической деформации в механизме возникновения адгезионных и когезионных связей в покрытии. Очевидно, что достижение в процессах газотермического напыления температуры частиц, соизмеримой с температурой их плавления, не является обязательным условием образования покрытия, и недостаток энтальпии частиц может быть компенсирован их кинетической энергией. Таким образом, метод ВВТН, обеспечивая нагрев металлических частиц до 1500 К и более и одновременно разгон до скоростей, соизмеримых с критической скоростью холодных частиц, в принципе позволяет наносить покрытия из любых металлических порошков, допускающих такой нагрев, а также из композиционных порошков с металлической связкой.

Практика воздушно-топливного напыления подтверждает этот вывод: анализ приведенных в [5 – 7] микроструктур и свойств покрытий из никель-хромовых сплавов Ni-22Cr11AlY, Ni-15CrB4Si, Co-32Ni22Cr8Al0.6Y, твердых сплавов на основе карбида вольфрама WC-12Co, WC-10Co4Cr и карбида хрома Cr3C2-20NiCr, нанесенных по технологии ВВТН (методом AC-HVAF) установкой Intelli-Jet (фирмы UniqueCout Technologies, США), позволяет отнести эти покрытия к наилучшим образцам газотермических покрытий. Для них характерны пористость на уровне менее 1%, высокая адгезионная прочность (металлов – 45 – 75 МПа, карбидов – 65 – 75 МПа), обусловленная минимумом дефектов на границе покрытия с подложкой, и исключительно

низкое содержание оксидов [5]. Детальное исследование химического состава нихромового (Ni80/Cr20) ВВТН-покрытия показало сохранение в нем содержания оксидов на уровне исходного в порошке [8].

В ИПМ НАН Украины разработана схема газодинамического тракта горелочных устройств для ВГПН с расходным управлением параметрами газового потока, позволяющая в 1,5 – 2 раза повысить эффективность процесса межфазного теплообмена без заметной потери скорости частиц [9]. По этой схеме выполнена двухкамерная горелка для ВВТН «Град-В», показанная на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид двухкамерной горелки для ВВТН «Град-В»

С использованием этой горелки были нанесены образцы порошковых покрытий из следующих промышленных порошков:

1. ПР-Х18Н9 (нержавеющая сталь; основа – Fe, 16÷20% Cr, 8÷11% Ni, < 0,9% C; дисперсность – 50 мкм).
2. ПГ-С27 (высоколегированный чугун, основа – Fe, 25÷28% Cr, 3,3÷4,5% C; дисперсность – 80 мкм).
3. ПГ-10Н-01 (самофлюсующийся никель-хромовый сплав; основа – Ni, 14÷20% Cr, 2,8÷3,4% В; дисперсность – 100 мкм).

4. ПГ-СР4 (самофлюсующийся никель-хромовый сплав; основа – Ni, 15÷17% Cr, 3,1÷4% В, 2,7÷3,7% Si, <5% Fe; дисперсность – 100 мкм).

5. ПГ-10К-01 (кобальт-никель-хромовый сплав; основа – Co; 28÷32% Ni, 21÷25% Cr, <2% Fe, 1,3÷1,7% C, 0,8÷1,3% Si, 1,2÷1,8%В, 3,5÷4,5% W; дисперсность – 100 мкм).

6. ВН-20 (металлокерамический твердый сплав; основа – WC, 20% Ni; дисперсность – 80 мкм).

Напыление производилось топливной парой воздух-водород при соотношении компонентов близком к стехиометрическому и давлении в КС  $P_{кс} = 1,0$  МПа, расход топливной смеси составлял 27,4 г/с, расход порошка 1,9 – 2,5 г/с. Дистанция напыления составляла 200 мм; скорость перемещения пятна напыления – 80 мм/с. Покрытия наносились на плоские подложки из стали 20 толщиной 4 мм. Толщина покрытия составляла 0,2...1,5 мм, коэффициент использования порошка – 0,43...0,64.

Из образцов покрытий изготавливали шлифы, которые исследовали по методике [9]. Адгезионная прочность определялась штифтовым методом.

Полученные покрытия характеризуются высоким качеством поверхности и стабильностью свойств. Их свойства приведены в табл. 2, характерная микроструктура покрытия из порошка высоколегированного чугуна ПГ-С27 показана на рис. 2.

Таблица 2

Свойства ВВТН покрытий

Марка порошка	Пористость, %	Адгезия, МПа	Твердость, HRC
ПР-Х18Н9	< 1,5	78...83	30...33
ПГ-С27	< 2,0	46...52	48...50
ПГ-10Н-01	< 4,0	68...71	57...62
ПГ-СР4	< 3,5	66...70	53...55
ПГ-10К-01	< 5,0	48...52	42...55
ВН-20	< 3,0	78...108	–

Таким образом, адгезионная прочность полученных металлических покрытий находится на уровне покрытий, нанесенных методом AC-HVAF, а металлокерамического покрытия на основе карбида вольфрама – даже существенно выше и соответствует прочности детонационных покрытий. В то же время, пористость этих покрытий заметно выше. Это объясняется тем, что при напылении методом AC-HVAF использовались оптимизированные по гранулометрическому составу порошки с размером частиц менее 40 мкм, что обеспечило их более высокую среднюю скорость и, соответственно, более плотную упаковку в покрытии.

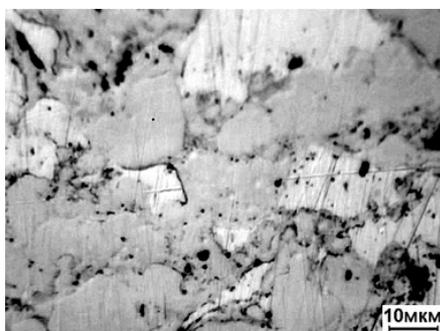


Рис. 2. Микроструктура поперечного шлифа покрытия из высоколегированного чугуна ПГ-С27

В отличие от процесса AC-HVAF, ориентированного на достижение максимальной скорости твердых частиц, процесс с расходным управлением параметрами двухфазного потока направлен на достижение их максимально допустимой температуры. В качестве последней может быть принята либо температура плавления материала порошка, либо температура на 100 – 200° ниже неё, гарантирующая нахождение частиц в твердом, но достаточно пластичном состоянии, либо температура, при которой в материале начинают происходить нежелательные физико-химические процессы (разложение, интенсивное окисление, фазовые переходы). При напылении двухкамерными горелками оптимизация теплового состояния и скорости частиц порошка обеспечивается заданием температуры и давления потока в газодинамическом тракте горелки, варьированием длин межкамерного канала и до-

и сверхзвуковых участков разгонного канала, а также распределением расходов топливной смеси, подаваемых через камеры сгорания.

Важным условием достижения высокого качества любых газотермических покрытий является соответствие гранулометрического состава напыляемых порошков энергетическим и технологическим возможностям применяемого оборудования. Оптимизация диапазона дисперсности порошков жаростойких сплавов, напыляемых горелкой «Град-В», проводилась путем расчета по методике [10] теплового состояния частиц по длине газодинамического тракта горелки в зависимости от их размера. За максимально допустимую температуру частиц принималась температура их плавления, за минимальную –  $0,9 T_m$ . При этом, для предотвращения отложения расплавленных частиц на стенках газодинамического тракта за минимальный размер принимался такой, при котором плавление происходило на участке, прилегающем к выходному сечению горелки.

Из-за неполноты сведений о теплофизических свойствах многокомпонентных сплавов расчет проводился для температур плавления 1600 К, 1700 К и 1800 К по значениям плотности, теплоемкости и теплоты плавления усредненным по соответствующим значениям этих свойств железа, никеля, хрома и кобальта.

Результаты моделирования показали, что оптимальные диапазоны размеров частиц порошков жаростойких сплавов зависят от их температуры плавления и для двухкамерной горелки «Град-В» составляют: +25 –50 мкм (1600 К), +20 –40 мкм (1700 К), +10 –30 мкм (1800 К).

Применение порошков оптимальной дисперсности позволяет повысить не только качество покрытий, но и коэффициент использования порошка: максимальное значение 0,72, достигнутое при напылении композиции WC-10Co-4Cr [7] вполне согласуется с лучшими результатами детонационного и плазменного методов. Между тем, именно эта ха-

характеристика определяет экономическую эффективность метода, т.к. стоимость затраченного горючего и сжатого воздуха не превышает по расчетам авторов 5% стоимости использованного порошка.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

Технология ВВТН позволяет наносить жаро- и износостойкие покрытия из металлических и композиционных с металлической связкой порошков, которые по своему качеству не уступают лучшим образцам покрытий, полученных другими методами газотермического напыления. Характерными особенностями таких покрытий являются низкая пористость (менее 1%) и сохранение химического состава исходного порошка, в том числе – по содержанию оксидов, а также высокая адгезионная прочность.

Технология ВВТН обладает наивысшей производительностью среди всех газотермических методов – до 20 кг/ч покрытия металлов и твердых сплавов.

Технология обладает высокой экономической эффективностью, обусловленной высоким коэффициентом использования порошка, применением наиболее доступных энергоносителей и относительной простотой оборудования, и может стать основным промышленным методом нанесения указанных классов газотермических покрытий.

Условием широкого применения ВВТН является организация производства порошков для напыления оптимального для этого метода гранулометрического состава.

## Литература

1. Irving, B. Thermal Spray: New technology is its lifeblood // *Welding Journal*. – 1998. – № 3. – С. 38-48.
2. Евдокименко Ю.И., Кисель В.М., Кадыров В.Х. Высокоскоростное газопламенное напыление порошковых алюминиевых защитных покрытий // *Порошковая металлургия*. – 2001. – № 3/4. – С. 30-37.
3. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. Метод «холодного» газодинамического напыления //

Новые материалы и технологии. Теория и практика упрочнения материалов в экстремальных процессах. – Новосибирск: Наука, 1992. – С. 146-167.

4. Патент РФ №1773072, 10.03.95. – Бюл. №7.
5. Verstak A., Baranovski V. Activated Combustion HVOF Coatings for Protection against Wear and High-Temperature Corrosion // *Proc. of the Int. Thermal Spray Conf. 2003 “Thermal Spray 2003: Advancing the Science and Applying the Technology”*, 2003. – Vol. 1. – P. 369.
6. Verstak A., Baranovski V. Deposition of carbides by Activated Combustion HVOF Spraying // *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application*, May 10-14, 2004 (Osaka, Japan), DVS-German Welding Society. – 2004. – P. 551-555.
7. Verstak A., Baranovski V. AC-HVOF sprayed Tungsten Carbide: Properties and Applications // *IEEE ITSC (2006, September 17-20)*. – Toronto, Canada. – [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [www.uniquecoat.com/PDF/Articles/ITSC\\_2006.pdf](http://www.uniquecoat.com/PDF/Articles/ITSC_2006.pdf).
8. Trompetter W.J., Markwitz and Hyland M. Role of oxides in high velocity thermal spray coatings // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* Vol. 190, Issues 1-4, (May 2002). – P. 518-523.
9. Евдокименко Ю.И., Кисель В.М., Кадыров В.Х. Высокоскоростное газопламенное напыление двухкамерными горелочными устройствами // *Порошковая металлургия*. – 2003. – № 11/12. – С. 45-54.
10. Тимошенко В.И., Белоцерковец И.С. Исследование процессов в горелочных устройствах для высокоскоростного газопламенного напыления порошковых материалов с использованием расходного способа воздействия на поток // *Инженерно-физический журнал*. – 2002. – № 2. – С. 36-41.

*Поступила в редакцию 1.06.2007*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.А. Урюков, Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАНУ, Киев.