

УДК 621.793.71

**В. М. Кисель, Ю. И. Евдокименко**

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВОЗДУШНО-ТОПЛИВНОГО НАПЫЛЕНИЯ**  
(Обзор)

*Наведено результати аналізу стану та розвитку технологій високоскоростного повітряно-топливного напылення. Показано, що це є перспективні технології отримання покриттів з високотемпературних матеріалів.*

**Ключові слова:** покриття, повітряно-топливне напылення, газодинамічне покриття, високотемпературні матеріали.

**Введение**

По оценкам экономических экспертов Европейского Союза объем услуг по газотермическому нанесению покрытий в странах ЕС возрастает с начала 90-х годов не менее, чем на десять миллионов евро в год и составил в 2000-м году 400 млн. евро, а в 2010 году по прогнозам составит 500 млн. евро [1], а общемировой — 4–5 млрд. долларов [2].

За сто лет своего существования газотермическое напыление (ГТН) превратилось, с одной стороны, в комплекс индустриальных технологий, обеспечивающих создание функциональных покрытий при производстве высокотехнологичной продукции машиностроения, конструирование устройств для их осуществления, а с другой — в прикладную научную дисциплину, изучающую закономерности формирования покрытий, а также разрабатывающую физические способы создания высокоэнергетических двухфазных потоков. В процессе своего развития ГТН, начинавшееся с газопламенного напыления (ГПН) и электродуговой металлизации (ЭДМ), обогащалось новыми методами напыления (плазменное (ПН), детонационное (ДН)), расширяющими его возможности и сферы применения. Последние десятилетия ознаменовались появлением и стремительным развитием технологий высокоскоростного кислородно-топливного напыления (ВКТН) и “холодного” газодинамического напыления (ГДН) [3]. В этих методах разгон частиц напыляемого материала осуществляется сверхзвуковым потоком высокотемпературных продуктов сгорания углеводородных топлив в кислороде при ВКТН или подогретого воздуха (в особых случаях — гелия или водорода) при ГДН. При ГДН адгезионные и когезионные связи в покрытии образуются только за счет пластической деформации напыляемых частиц без термического воздействия на них. Это позволяет получать высококачественные покрытия из материалов, нагрев которых недопустим из-за термического разложения или иных физико-химических превращений. Однако эта технология экономически недостаточно эффективна в силу своей низкой производительности. К тому же она применима только к порошкам пластичных материалов, частицы которых способны выдержать высокоскоростное соударение без разрушения.

Методом ВКТН наносят покрытия практически из всех применяемых в ГТН материалов с качеством не хуже, чем у детонационных покрытий, и с

---

© Кисель В'ячеслав Михайлович, Евдокименко Юрій Ігоревич, наукові співробітники Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України.

производительностью, не уступающей ГПН и ЭДМ. Серьезным толчком к интенсивному внедрению и аппаратурному совершенствованию метода в середине 90-х годов прошлого века послужило ужесточение в США и странах ЕС санитарных требований к технологии гальванического хромирования [4, 5]. Эти требования касаются снижения содержания в отходах производства канцерогенного шестивалентного хрома. ВКТН оказалось серьезной альтернативой гальваническому хромированию и постепенно вытесняет его в таких применениях, как износостойкие покрытия. ВКТН-покрытия на основе карбида вольфрама имеют более высокую твердость и стойкость к истиранию по сравнению с гальваническими и при этом существенно дешевле их [6].

Недостатками ВКТН является избыточная для многих напыляемых материалов температура несущего газового потока, приводящая, в частности, к окислению материала покрытия и возникновению в нем недопустимых термических напряжений, а также необходимость использования относительно дорогого кислорода.

### Основы технологии высокоскоростного воздушно-топливного напыления

Высокоскоростное воздушно-топливное напыление (ВВТН), запатентованное в 1992 г. [7] и интенсивно развивающееся в последние годы, в значительной мере унаследовало достоинства газодинамического и высокоскоростного кислородно-топливного напыления и, в то же время, позволило преодолеть основные их недостатки. При ВВТН нагрев и ускорение частиц напыляемого материала происходят в потоке продуктов сгорания воздушно-топливной смеси, истекающем под давлением из камеры сгорания (КС) горелки через протяженный сопловой канал. На рис. 1 показана наиболее общая конструктивная схема горелки с осевой подачей порошка.

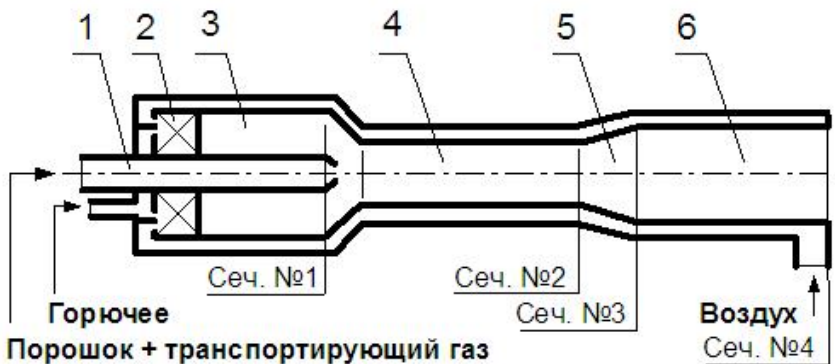


Рис. 1. Конструктивная схема ВВТН-горелки:

1 — трубка подачи порошка; 2 — смеситель-завихритель; 3 — камера сгорания; 4 — дозвуковой участок соплового канала; 5 — сверхзвуковой конфузур; 6 — сверхзвуковой разгонный канал

На схеме указаны наиболее характерные сечения газодинамического тракта (№ 1 — КС перед соплом, № 2 — критическое сечение сопла, № 3 — сечение с максимальной скоростью газового потока, № 4 — выходное сечение), а в табл. 1 — значения температуры и скорости газового потока для различных горючих смесей при давлении в КС 1,0 МПа, полученные расчетом по методике [8].

Таблица 1

**Максимальные параметры потока продуктов сгорания воздушно-топливных смесей с различными горючими в характерных сечениях горелки для ВВТН при давлении в КС 1,0 МПа**

| Горючее         | Температура (К) и скорость (м/с) газа в сечении |       |      |     |      |      |      |      |
|-----------------|---|-------|------|-----|------|------|------|------|
|                 | № 1   |       | № 2  |     | № 3  |      | № 4  |      |
|                 | $T$   | $V$   | $T$  | $V$ | $T$  | $V$  | $T$  | $V$  |
| Водород         | 2370  | < 100 | 2153 | 895 | 1570 | 1650 | 1650 | 1570 |
| Метан           | 2205  | < 100 | 1995 | 800 | 1440 | 1500 | 1510 | 1430 |
| Пропан          | 2270  | < 100 | 2065 | 805 | 1495 | 1507 | 1568 | 1438 |
| Керосин (1 МПа) | 2255  | < 100 | 2040 | 810 | 1483 | 1485 | 1555 | 1418 |

Как следует из данных табл. 1, водород является наиболее термодинамически эффективным горючим, но его применение ограничено экономическими соображениями. Промышленные установки ВВТН работают, как правило, на пропане, метане, газовых смесях или керосине. При этом конструкции современных горелок позволяют варьировать температуру перед сопловым каналом в пределах от максимального до 1000 К и менее.

Анализ табл. 1 показывает, что энергетические возможности метода позволяют нагревать частицы различных материалов до температур 1400–1600 К и разгонять их до скоростей порядка 1000 м/с. Такие параметры процесса достаточны для формирования покрытий из большинства металлических материалов. Хотя первоначально метод предназначался для нанесения антикоррозионных покрытий из легкоплавких металлов, уже в начале 90-х годов на экспериментальных установках были получены покрытия из суперсплавов и твердых сплавов на основе карбида вольфрама [7, 9]. В настоящее время с разработкой новых схем организации рабочих процессов в горелках [10, 11], технология ВВТН позволяет наносить высококачественные покрытия из большинства металлических материалов и композиций со связкой из них. При этом ВВТН превосходит остальные методы газотермического напыления по производительности и экономической эффективности.

### **Механизм формирования ВВТН-покрытий**

В зависимости от теплофизических свойств, и дисперсности напыляемого материала и режима работы горелки формирование покрытий в процессе ВВТН может происходить как из частиц, находящихся в расплавленном (полностью или частично) состоянии, так и из твердых частиц. В первом случае реализуется традиционный для газотермических методов механизм образования покрытий с характерной ламельной структурой, состоящей из плоских “чешуек”, образованных при растекании соударяющихся жидких капель по преграде [3]. Во втором случае формирование покрытий происходит по характерному для ГДН механизму [12], когда налетающие с высокой скоростью

частицы в процессе ударного нагружения претерпевают значительное пластическое деформирование и закрепляются в покрытии за счет связей, подобных образующимся при сварке давлением. Из практики ГДН известно, что для образования покрытия частицы должны иметь скорость, превышающую некоторое критическое значение, характерное для каждой пары "напыляемый материал–материал подложки" и для большинства металлов лежащее в диапазоне 500–800 м/с [13]. При этих скоростях кинетическая энергия частицы оказывается достаточной для 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. Уменьшение работы пластической деформации и энергии активации атомов материала частиц с увеличением их температуры приводит к снижению критической скорости "напыляемости" частиц, что проявляется, в частности, в возрастании коэффициента использования порошка при ГДН, отмеченном в [14]. Нагрев частиц газовым потоком в этом случае оказывается средством повышения их пластичности для предотвращения разрушения или растрескивания при высокоскоростном соударении. Для ГДН-покрытий характерна структура, состоящая из плотно упакованных частиц, сжатых в направлении соударения. Эти покрытия характеризуются повышенной твердостью и изменением других механических свойств, сопутствующих деформационному наклепу, при этом химический и фазовый состав их полностью соответствует исходному порошку. Подобную же структуру имеют ВГПН-покрытия, когда температура формирующих их высокоскоростных частиц при нагреве в потоке остается существенно ниже температуры плавления. Этот режим напыления был впервые получен Дж. Браунингом (James Browning), обнаружившим, что ВКТН-покрытия, полученные при захолаживании несущего газового потока, и ВВТН-покрытия отличаются структурой из плотно упакованных и направленно деформированных частиц, низким содержанием оксидов, а также повышенной адгезионной прочностью [15]. Позднее было замечено, что увеличение степени деформации частиц, определяемой их скоростью при соударении и пластичностью, сопровождается уменьшением пористости покрытия и повышением его прочности [16].

Технология ВВТН с ее относительно низкой температурой газовой фазы потока оказалась наиболее удобным методом для нанесения покрытий из мелкодисперсных (менее 40 мкм) порошков без плавления и перегрева частиц и связанных с этим изменений структуры и состава материала. По данным [17] содержание кислорода в ВВТН-покрытии состава Ni–45 Cr–1 Ti составляет 0,28% (при 0,06% в исходном порошке), в то время как в ВКТН-покрытии из этого порошка — 1,9%, в плазменном — 3,8%, а в ЭДМ-покрытии — 7% при содержании кислорода в распыляемой проволоке 0,02%. В работе [18] указывается, что эрозионная стойкость ВВТН-покрытий из WC–CoCr на 25% выше, чем у ВКТН-покрытий при относительной декарбидизации в процессе напыления 13% и 54%, соответственно. Сравнение свойств покрытий из твердого сплава на основе карбида вольфрама, полученных методами ВКТН и ВВТН, указывают на более высокую износостойкость ВВТН-покрытия [19]. Комплексное исследование химического состава нихромового (Ni80/Cr20) ВВТН-покрытия показало сохранение в нем содержания оксидов на уровне исходного в порошке [20]. На рис. 2 показана характерная микроструктура ВВТН-покрытия из сферических частиц порошка никель-хром-молибденового сплава Inconel 625 [21].

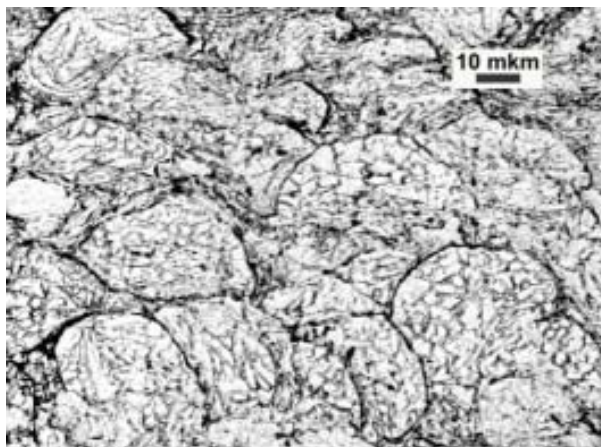


Рис. 2. Структура ВВТН-покрытия из порошка суперсплава Inconel 625 (травленный шлиф)

Структура покрытия образована частицами, неоднородно деформированными в направлении удара — верхняя их часть сохраняет округлую форму. Особенностью структуры покрытия является плотное прилегание частиц друг к другу с деформационным заполнением пустот между ними. Малочисленные поры в покрытии имеют незначительные (менее 5 мкм) размеры и локализованы, как правило, в зонах контакта нескольких частиц.

Ударное взаимодействие твердых частиц с преградой сопровождается их как пластической, так и упругой деформацией, которая приводит к возникновению в покрытиях напряжений сжатия [17]. Эти напряжения соизмеримы по величине с термическими напряжениями растяжения, возникающими при остывании покрытия, и в значительной мере компенсируют их. В результате такие покрытия отличаются существенно меньшими величинами остаточных напряжений, которые могут быть как растягивающими, так и сжимающими в зависимости от степени деформации и температуры частиц, коэффициентов термического расширения материалов покрытия и подложки. Это повышает адгезионную и когезионную прочность покрытий и позволяет создавать их с толщиной, значительно превосходящей достигаемую при напылении жидких частиц. В работе [22] приведен пример ВВТН-покрытия из твердого сплава WC–12 Co толщиной 12,5 мм, не уступающего по своим свойствам ВКТН-покрытию из этого материала и заметно превосходящего его по сопротивлению эрозии при повышенных температурах и трещиностойкости.

Очевидно, что существуют условия проведения ВВТН, при которых покрытие формируется одновременно из твердых и расплавленных частиц. Так, в случае гранулометрической неоднородности напыляемого порошка мелкие частицы могут быть расплавлены, а более крупные — наноситься в твердом состоянии.

На рис. 3 показана микроструктура ВВТН-покрытия, полученная при напылении порошка ПН85Ю15 с размером сферических частиц менее 40 мкм [23].

Покрытие образовано сильно деформированными крупными частицами и ламелями, сформированными из более мелких расплавленных частиц. По данным рентгенофазного анализа основными фазами в порошке и в покрытии являются интерметаллидные соединения  $Ni_3Al$  и  $Ni_5Al_3$ , в значительном количестве присутствуют свободный никель и  $NiAl$ , а так же имеется небольшое количество  $NiAl_3$ .

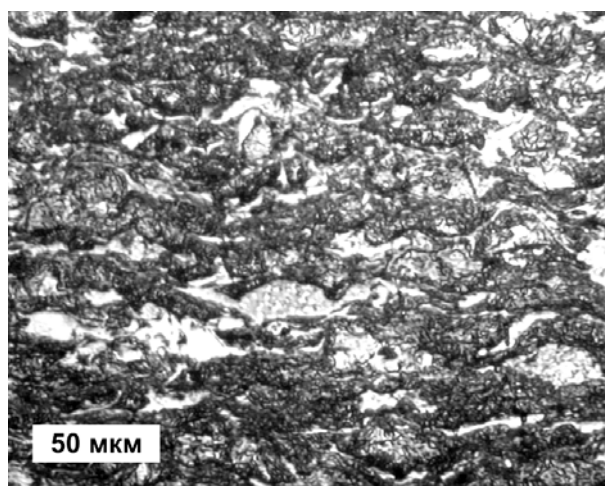


Рис. 3. Структура покрытия ПН85Ю15 (травленный шлиф)

Таким образом, выбор гранулометрического состава порошка и режима работы горелки, определяющего температуру несущего газового потока, обеспечивает протекание процесса напыления с реализацией того или иного механизма формирования покрытия, позволяя получать различные типы его структуры и, соответственно, присущие им физико-механические свойства. Для каждого порошкового материала в конкретных условиях ВГПН существуют ограничения на максимальные и минимальные размеры частиц, определяющие оптимальный гранулометрический состав порошка. Верхний предел соответствует максимальному размеру частиц, имеющих минимально необходимые для формирования покрытия значения энергетических параметров. Нижний — определяется условием недопущения плавления частиц в дозвуковой части тракта горелки из-за возможности их осаждения на его стенках.

В работе [23] представлены результаты расчета скорости и теплового состояния частиц интерметаллидных соединений  $Ni_3Al$  и  $NiAl$  в зависимости от их дисперсности, достигаемые на выходе из ВВТН-горелок двух типов, а также их сопоставление со свойствами и структурами полученных покрытий. Эти соединения имеют температуры плавления 1663 К и 1911 К, плотности —  $7,35 \text{ г/см}^3$  и  $6,4 \text{ г/см}^3$ , соответственно, и очень близкие значения остальных теплофизических свойств, определяющих темп их нагрева. Результаты расчета показывают, что при ВВТН горелкой традиционной схемы (рис. 1) нанесение покрытий из интерметаллидов системы Ni-Al возможно лишь в очень узких диапазонах дисперсности порошков: 10–20 мкм для  $Ni_3Al$  и 5–15 мкм для  $NiAl$ . В то же время, напыление горелкой с предварительным нагревом частиц в трубке подачи порошка обеспечивает необходимые значения параметров частиц  $Ni_3Al$  в диапазоне размеров 45–65 мкм и частиц  $NiAl$  — в диапазоне 20–45 мкм.

Аналогичные расчеты, проведенные для металлов и сплавов с температурой плавления 1600–2000 К, показывают, что при нанесении их порошков методом ВВТН минимальный диаметр сферических частиц составляет 5–30 мкм, максимальный — 30–60 мкм, а наиболее характерным является диапазон размеров 20–45 мкм. В настоящее время все основные мировые производители порошков для ГТН интенсивно осваивают этот сегмент рынка, расширяя ли-

нейку своей продукции порошковыми материалами, специально предназначенными для ВВТН, что позволяет оптимизировать технологический процесс и значительно облегчает промышленное внедрение технологии ВВТН. Так, компания Praxair (США) выпускает широкий ассортимент сплавов на основе никеля и кобальта с размерами частиц (мкм)  $-45/+5$ ,  $-45/+10$ ,  $-45/+15(16)$ ,  $-45/+20$ ,  $-53/+10$ ,  $-53/+20$ ,  $-63/+20$ ,  $-63/+20$  [24].

### Области применения и свойства ВВТН-покрытий

Анализ парка производственного оборудования основных промышленных отраслей определил номенклатуру изделий, на которые нанесение покрытий газотермическими методами на стадиях производства и ремонта наиболее экономически целесообразно. Их далеко не полный перечень охватывает не менее 60% комплектующих основного промышленного оборудования, определяющих его ресурс и составляющих не менее 30% его стоимости [25]. Результаты этого исследования показывают, что значительная доля перспективных задач связана с напылением металлических материалов на основе сплавов железа, никеля, хрома, кобальта и композиционных материалов на основе карбидов ( $WC$ ,  $Cr_2C_3$ ) и оксидов ( $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $TiO_2$ ) с металлической связкой из этих сплавов. Многие из этих задач направлены на создание альтернативных гальваническому твердому хромированию газотермических покрытий, работающих в различных эксплуатационных условиях. К ним, в первую очередь, относятся покрытия на штоках цилиндров гидро- и пневматических приводов, плунжерах гидромашин, штоках гидроамортизаторов, то есть покрытия на поверхностях подвижных соединений, сопрягаемых с уплотнениями высокого давления. Характерным примером таких изделий могут служить штоки амортизаторов механизмов шасси авиатехники с ВВТН-покрытиями из твердого сплава  $WC-10 Co-4 Cr$  [26]. Общими требованиями к таким изделиям являются высокая износостойкость в условиях абразивного износа в сочетании с высокой чистотой поверхности, необходимой для обеспечения герметичности соединения. Еще более высокие требования к качеству поверхности предъявляются в барабанах и валах печатных машин и каландров, где необходима обработка поверхности до состояния оптического зеркала. Другая группа задач объединяет износостойкие покрытия на валах и корпусах в посадочных местах подшипников, рабочие поверхности подшипников скольжения, и другие поверхности трения. Эти покрытия, как правило, также требуют механической обработки (шлифования) не ниже седьмого класса шероховатости (менее  $Ra 1,0$ ), а при высоких скоростях вращения — не ниже девятого класса (менее  $Ra 0,32$ ).

Свойства гальванического хромового покрытия могут служить эталонными индикаторными величинами при оценке качества альтернативных покрытий, получаемых другими методами. В зависимости от эксплуатационных требований разрабатываемые газотермические покрытия должны иметь более высокую температуру эксплуатации (у твердого хрома — более  $400^\circ C$ , длительно —  $200^\circ C$ ), превосходить твердое хромирование по коррозионной и износостойкости [27]. В настоящее время, в авиационной промышленности ведущих стран происходит интенсивная замена гальванического хромирования ВВТН-покрытиями из твердых сплавов на основе карбида вольфрама, например,  $WC-10 Co-4 Cr$  [26], как перспективные рассматриваются также композиции на основе карбида хрома со связкой из высоколегированных никелевых сплавов и суперсплавы [28]. В цикле работ [22, 29, 30] представлены результа-

ты исследования ВВТН-покрытий, нанесенных из этих материалов методом АС-НВАФ, и показано их существенное превосходство над аналогичными ВКТН-покрытиями и твердым хромированием. Покрытия полностью удовлетворяют требованиям стандартов и технических условий авиапромышленности США, превосходя, в частности, в 30 раз по абразивному износу гальванический хром и в 10 раз по износостойкости ВКТН-покрытия из расплавленных частиц [29]. В [21] указывается, что твердость ВВТН-покрытий состава WC–10 Co–4 Cr достигает  $1500\text{ HV}_{300}$ , составов WC–20 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–7 Ni и Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–25 Ni составляет  $1270\text{--}1400\text{ HV}_{300}$  и  $950\text{--}1020\text{ HV}_{300}$ , соответственно, а согласно данным [31] твердость ВВТН-покрытия Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–NiCr —  $1150\text{ HV}_{300}$ . Коэффициент использования порошка при напылении композиций на основе карбида хрома современным оборудованием составляет до 75% [21]. В [32] показано, что адгезионная прочность покрытия из WC–20 Ni превышает 100 МПа.

Еще одна большая группа задач — это нанесение защитных покрытий, работающих в условиях эрозионного, химического и термохимического воздействия на поверхности относительно большой площади. Они, как правило, не нуждаются в дополнительной механической обработке, но требуют высокой сплошности покрытия или, как минимум, недопущения сквозной пористости. Особенно актуальны эти задачи в нефтехимической и газоперерабатывающей промышленности, оборудование которой характеризуется большими габаритами, мощностями и, соответственно, стоимостью. Так, ВВТН внутренних поверхностей только одной колонны адсорбера установки очистки природного газа на Астраханском ГПЗ обеспечило экономический эффект более 1 млрд. рублей [33].

Компанией ТСЗП (РФ) было произведено нанесение двухслойного покрытия из высоколегированных сталей составов Fe–Cr–Ni–B–Si–C и Fe–Cr–Ni–Mo–Si–C с толщиной каждого слоя  $100^{+20}$  мкм, первый из которых (микротвердость 650–800 МПа) обеспечивает защиту от “подпленочной коррозии”, а второй (микротвердость 500–570 МПа) — основную защиту. Адгезионная прочность покрытия превышает 70 МПа, пористость — не более 1%. Дополнительно на покрытие наносился полимерный слой на эпоксидной, акриловой или фторполимерной основе. Эрозионно-коррозионный износ покрытия составляет 0,1 мм/год, в то время как непокрытой стали — 8–10 мм/год [34].



Рис. 4. Высокоскоростное воздушно-топливное напыление колонны адсорбера горелкой SB500 [33]



В обзоре материалов и покрытий, предназначенных для теплообменников и парогенераторов энергетических мусоросжигающих установок [35], указывается, что наиболее высокой стойкостью к химической коррозии и эрозии при повышенных температурах обладают многокомпонентные сплавы систем Fe–Cr–Ni и Ni–Cr. К материалам покрытий этих агрегатов предъявляются требования длительной работы (не менее 25 тыс. ч) при температурах 400–550 °С в условиях воздействия различных соединений серы, хлора, щелочных металлов, находящихся в газообразном и жидком состояниях, и эрозионного воздействия твердых частиц сажи. В работе приведен список из 24 перспективных материалов из сплавов указанных систем. Все они с успехом могут быть нанесены методом ВВТН.

Эффективную защиту от высокотемпературной коррозии обеспечивают покрытия из материалов на основе интерметаллидов системы Ni–Al и сплавов NiCoCrAlY, в которых одной из основных является  $\gamma$ -фаза NiAl. Эти соединения применяют в качестве подслоев, блокирующих доступ агрессивной среды к основному металлу в термобарьерных покрытиях в горячих зонах газовых турбин [32]. Как правило, эти подслои наносят ВКТН. Как показано в [23] ВВТН-покрытия из материалов на основе алюминидов никеля не уступают покрытиям, полученным другими газотермическими методами, в частности, имеют адгезионную прочность не ниже 50 МПа.

Высокое качество покрытий в сочетании с экономической эффективностью технологии способствует быстрому распространению установок для ВВТН на рынке оборудования для газотермического напыления. Процесс внедрения ВВТН развивается по двум направлениям — нанесению антикоррозионных покрытий на крупногабаритные стальные конструкции в полевых условиях и нанесению функциональных покрытий в производственных условиях.

Для установок, предназначенных для первой задачи, характерны автономность и мобильность, что определяет простоту как их структурных схем, так и конструктивных схем горелок. Обычно такие установки ориентированы на работу с передвижным дизель-компрессором для подачи сжатого воздуха в горелку, электроприводы в системах подачи и регулирования рабочих компонентов не применяются, порошок подается из самоопорожняющегося бункера, в качестве горючего используется жидкое топливо (дизтопливо или керосин), подаваемое за счет наддува сжатым воздухом напорного топливного бака. Преимуществами жидкого топлива является простота его транспортировки и хранения, относительная безопасность применения, стабильность подачи вне зависимости от температуры окружающей среды, высокая теплота сгорания; недостатками — большой объем КС, необходимый для полного сгорания, что увеличивает вес и теплонапряженность горелки, а также сложность осуществления надежного зажигания.

Этот путь развития оборудования ВВТН наиболее характерен для Украины и России, где и производится большая часть мобильных термоструйных установок. Необходимо отметить, что приоритет в разработке сверхзвуковых воздушнотопливных горелок технологического назначения в СССР принадлежит Харьковскому авиационному институту [37]. В настоящее время в Украине термоструйные установки для термоабразивной обработки (ТАО) и ВВТН выпускают ГИЦ “Львівантикор” (установка “Беркут”), НИЦ “Градиент”, г. Киев (установка “Струмів”) (рис. 5), НТФ “Спецтехавтоматика”, г. Харьков (установка для газоструйной термоабразивной очистки поверхностей, напыления покрытий и генерирования технологического парагаза), в РФ – фирма ТЕХМЕД, Туапсе.



Рис. 5. Установка термоабразивной очистки и напыления антикоррозионных покрытий “Струмінь”

Мобильные термоструйные позволяют производить очистку и подготовку поверхностей крупногабаритных металлоконструкций методом ТАО и последующее нанесение на них антикоррозионных ВВТН-покрытий из порошков или проволок цинка, алюминия и их сплавов. Порошковые покрытия имеют пористость на уровне 1–2%, высокую адгезионную прочность (например, у алюминиевых покрытий до 35 МПа) [38] и превосходят по своему качеству ЭДМ-покрытия. Установки позволяют получать покрытия столь же высокого качества и из других металлов и сплавов — олова, баббита, меди, латуни, бронзы, высоколегированного чугуна, нержавеющей сталей, и даже самофлюсующихся никелевых сплавов, хотя их напыление, как правило, производится на детали машин и механизмов в производственных условиях. Но основной сферой применения мобильных установок является антикоррозионная защита крупногабаритных стальных конструкций (мостов, трубопроводов, резервуаров, судов, гидротехнических сооружений и другого промышленного оборудования) при их производстве, монтаже и ремонте. Стоимость их в Украине и РФ не превышает \$15000 (без учета стоимости компрессора).

Установки ВВТН для нанесения функциональных покрытий из никелевых сплавов, суперсплавов и металлокерамических композиций на изделия машиностроения относятся к высокотехнологическому оборудованию, отличаются высоким уровнем автоматизации. Первой на рынке ГТН в середине 90-х годов появилась система AeroSpray 150 американской компании Browning Thermal Systems Inc., горелка которой была выполнена по схеме с радиальной подачей порошкового материала и работала на керосине [40]. Подобное оборудование производится и сейчас (Hyper-Sonic HVAF System компании Coaken Techno Co., Ltd, Япония) [41], но настоящий прорыв в развитии технологии высокоскоростного воздушно-топливного напыления был достигнут с реализацией концепции “активированного горения” (Activated Combustion HVAF) [10], во-

площенью в начале нынешнего десятилетия в горелках SB250 и SB500 установки Intelli-Jet (фирмы UniqueCoat Technologies, LLC, США). Оригинальная организация внутрикамерных процессов в этих горелках значительно повысила тепловую эффективность горелки, что позволило сократить расход топливных компонентов, уменьшить ее габариты по сравнению с громоздкими предшествующими образцами. Недостатком этой схемы является невозможность использования жидкого горючего и связанная с этим сложность повышения рабочего давления в КС горелки более 1,2 МПа и, значит, увеличения скорости напыляемых частиц.

В настоящее время компания UniqueCoat Technologies выпускает установки на базе контрольных стоек “UltraCoat” и “Quasar” с горелками M2 и M3 [21], также подобное оборудование под торговой маркой AcuKote производит компания Kermetico (США) [17]. В России оно распространяется группой компаний “Технологические системы защитных покрытий” (ТСЗП) как комплекс высокоскоростного напыления ТСЗП-HVAF-AK07 [42]. Последние модели установок для ВВТН отличает высокий уровень автоматизации управления режимами горелки (в том числе ее запуском) и порошкового питателя, позволяющий успешно интегрировать их в состав роботизированных комплексов с большим количеством степеней свободы манипуляторов горелки и обрабатываемой детали. На рис. 6 показана горелка M3 Supersonic Spray Gun, оснащенная датчиком контроля средней температуры частиц в потоке за ней и обратной связью с контрольной стойкой, позволяющей автоматически корректировать ее режим [21].



Рис. 6. Горелка M3 Supersonic Spray Gun

Такие установки для ВВТН ориентированы на применение исключительно порошковых материалов, их высокотехнологичные порошковые питатели-дозаторы с постоянным контролем расхода порошка позволяют автоматически выдерживать его с высокой точностью. Стоимость установок этого класса составляет \$45000–75000.

Кроме промышленных установок имеется несколько экспериментальных установок ВВТН в университетах и научных центрах, специализирующихся на проблематике ГТН. Примером может служить созданная на базе хорошо из-

вестной в СНГ горелки для ТАО установка Университета Н. Манделы, которая подробно описана в работе [43].

В Украине работы по созданию оборудования для высокоскоростного газопламенного напыления проводятся в ИПМ НАН Украины, где была разработана оригинальная схема газодинамического тракта горелочных устройств для ВГПН, позволяющая более чем в полтора раза повысить эффективность процесса теплообмена между газовой и дисперсной фазами потока [11]. На основе этой схемы разработаны горелки для ВКТН и ВВТН, работающие на газообразном и на жидком топливе [44]. Показанная на рис. 7 двухкамерная ВВТН-горелка "Град-ВМ" позволяет наносить покрытия, которые по своим свойствам не уступают покрытиям, полученных по технологии АС-HVAF [45].

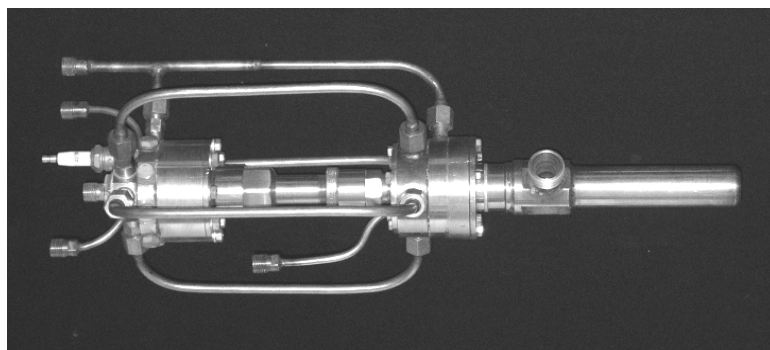


Рис. 7. Двухкамерная горелка для ВВТН "Град-ВМ"

Ориентировочный технико-экономический анализ показывает, что замена широко распространенного в промышленности процесса ВКТН процессом ВВТН обеспечивает снижение затрат на энергоносители более, чем в 10 раз, а затрат на оплату труда — более чем втрое.

### Выводы

Технология высокоскоростного воздушно-топливного напыления является одной из наиболее интенсивно развивающихся технологий газотермического напыления, обеспечивающей получение покрытий из порошковых металлических и композиционных материалов с металлической связкой.

Формирование покрытий при ВВТН может происходить из расплавленных или твердых частиц. Во втором случае ВВТН-покрытия отличаются исключительно плотной упаковкой сильно деформированных в направлении соударения частиц. Для ВВТН-покрытий характерны пористость на уровне менее 1% и высокая адгезионная прочность (до 100 МПа), обусловленные минимумом дефектов на границах частиц с подложкой и между собой, а также низким уровнем оксидов в них.

Технология ВВТН является перспективным методом нанесения износостойких покрытий, альтернативных гальваническим хромовым покрытиям, что определяется высоким качеством и многообразием их составов с соответствующими эксплуатационными свойствами, высокой производительностью и экономической эффективностью технологии. Метод ВВТН при равном или лучшем качестве металлических покрытий обеспечивает втрое большую производительность по порошку при равной тепловой мощности в сравнении с методом ВКТН.

*Приводятся результаты состояния и развития технологий высокоскоростного воздушно-топливного напыления. Показано, что это есть перспективные технологии получения покрытий из высокотемпературных материалов.*

**Ключевые слова:** покрытия, воздушно-топливное напыление, газодинамические покрытия, высокотемпературные материалы.

*Results of development of high-speed air-oil coatings are shown. These technologies are very perspective for obtaining of high temperature materials coatings.*

**Keywords:** coatings, air-oil coatings, gas-dinamic coatings, high-temperature materials.

1. *Alternative to chromium: characteristics and wear behavior of HVOF coatings for gas turbine shafts repair (heavy-duty)* // Tahar Sahraoui, Nour-Eddine Fenineche, Ghislain Montavon, Christian Coddet / J. Mater. Proces. Techn. – No. 152. – 2004. – P. 43–55.
2. *Oxidation Behavior of Aluminum During Thermal Spray* // Donna Guillen / Publisher: VDM Verlag Dr. Müller – 2009. – Germany. – 128 p.
3. *Газотермическое напыление: учебное пособие* / под ред. Л. Х. Балдаева. – М.: Маркет ДС. – 2007. – С. 344.
4. [http://www.hcat.org/replace\\_hc.html](http://www.hcat.org/replace_hc.html)
5. [http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show\\_document?p\\_id=18599&p\\_table](http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_id=18599&p_table)
6. *Sartwell B. D. HVOF vs. HVOF* / B. D. Sartwell, P. M. Natishan, K. O. Legg, J. D. Schell, J. P. Sauer // Proceedings of the AESF Aerospace / Airline Plating Forum. – 1998. – P. 97–104.
7. *Пат. 5120582 США. Maximum combustion energy conversion air fuel internal burner.* James A. Browning. Publication Date: Jun. 09.1992.
8. *Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справочник* / под ред. Глушко В. П. Том 1. Методы расчета. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П., Худяков В. А. – М. ВИНТИ. – 1971. – С. 266.
9. *Comparative study of WC-cermet coatings sprayed via the HVOF and the HVOF Process* // Jacobs L., Hyland M., Bonte M. / J. Therm. Spray Techn. – V. 7. – No. 2. – 1998. –P. 213–218.
10. *Пат. 6245390 США. High-velocity thermal spray apparatus and method of forming materials.* Baranovski V., Verstak A. Publication Date: 06.12.2001.
11. *Пат. 57147 UA. Спосіб газотермічного напылення порошкових матеріалів* // Ю. І. Євдокименко, В. М. Кисіль и др. / Промислова власність. – 2003. – № 6.
12. *An Exploration of the Cold Gas-Dynamic Spray Method for Several Materials Systems* // McCune R. C., Papyrin A. N. et al. / Advances in Thermal Spray Science & Technology, ed. by Berndt C. C. and S. Sampath. Materials Park, OH. ASM International. 1995. – P. 1–5.
13. *Grujicic M. Adiabatic shear instability based mechanism for particles/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process* / M. Grujicic, C. L. Zhao, W. S. DeRosset, D. Helfritsch // Materials and Design. – 2004. – V. 25. – No. 8. – P. 681–688.
14. *Пат. 1773072 РФ, МПК 6 B23C4/00. Способ нанесения металлопорошковых покрытий* / А. П. Алхимов, В. Ф. Косарев, Н. И. Нестерович – 10.03.95. – Бюл. № 7.
15. *Browning J. A. Hypervelocity Impact Fusion. A Technical Note* // J. Therm. Spray Techn. – 1992. – Vol. 1. – № 4. – P. 289–292.

16. *Hanson T. C.* Independent Control of HVOF Particle Velocity and Temperature / T. C. Hanson, C. M. Hacket, G. S. Settles // *Ibid.* – 2003. – Vol. 12. – No. 3. – P. 403–415.
17. *Официальный сайт* компании Kermetico, Inc. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.kermetico.com/tech-oxidation.html>
18. *Heimann R. B.* Recently Patented Work on Thermally Sprayed Coatings for Protection Against Wear and Corrosion of Engineered Structures / R. B. Heimann, H. D. Lehmann // *Rec. Pat. Mat. Sci.* – 2008. – Vol. 1. – No. 1. – P. 41–55.
19. *Jacobs L.* Comparative study of WC-cermet coatings sprayed via the HVOF and the HVAF Process / L. Jacobs, M. M. Hyland, M. De Bonte // *J. Ther. Spray Techn.* – 1998. – No. 2. – P. 213–218.
20. *Trompetter W. J.* Role of oxides in high velocity thermal spray coatings / W. J. Trompetter, A. Markwitz, M. Hyland // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* – 2002. – Vol. 190, No. 1–4. – P. 518–523.
21. *Официальный сайт* компании UniqueCoat Technologies, LLC. Электронный ресурс. Режим доступа: [www.uniquecoat.com](http://www.uniquecoat.com).
22. *Verstak A.* Activated Combustion HVAF Coatings for Protection against Wear and High-Temperature Corrosion / A. Verstak, V. Baranovski // *Proc. of the International Thermal Spray Conference "Thermal Spray 2003: Advancing the Science and Applying the Technology"*. – 2003. – Vol. 1. – P. 369–376.
23. *Кисель В. М.* Нанесение покрытий из интерметаллидных Ni–Al соединений методом высокоскоростного воздушно-топливного напыления / В. М. Кисель, Ю. И. Евдокименко, Г. А. Фролов, С. В. Бучаков // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2009. – № 10 (67). С. 50–54.
24. *Официальный сайт* компании Praxair Surface Technologies, Inc. Электронный ресурс. Режим доступа: [www.praxair.com](http://www.praxair.com).
25. *Балдаев Л. Х.* Перспективы применения методов газотермического напыления при ремонте и производстве оборудования в промышленности / Л. Х. Балдаев, Е. А. Панфилов // *Конверсия в машиностроении.* – 2006. – № 2. – С. 34–39.
26. *Nestler M. S.* HVOF-spraying vs. hard chrome plating coating characteristics and aircraft application / M. S. Nestler, G. Prenzel, T. Seitz // *Proc. 15th Intern. Thermal Spray Conf.* – 1998. – P. 1073–1078.
27. *Evans B.* HVOF as a Hard Chrome Replacement on Landing Gear / B. Evans, R. Panza-Giosa, E. Cochien Brikaras // *ITSC 2006 (2006, May 12–17). Seattle, Washington, USA.* [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://asm.confex.com/asm/itsc06/techprogram/paper\\_12113.htm](http://asm.confex.com/asm/itsc06/techprogram/paper_12113.htm).
28. *Sahraoui T.* Alternative to chromium: characteristics and wear behavior of HVOF coatings for gas turbine shafts repair (heavy-duty) / T. Sahraoui, N.-E. Fenineche // *J. Mater. Proces. Techn.* – 2004. – V. 152, No. 1. – P. 43–55.
29. *Verstak A.* Deposition of carbides by Activated Combustion HVAF Spraying / A. Verstak, V. Baranovski // *Proc. Inter. Thermal Spray Conf. Thermal Spray 2004: Advances in Technology and Application* – 2004. – P. 551–555.
30. *Verstak A.* AC-HVAF sprayed Tungsten Carbide: Properties and Applications / A. Verstak, V. Baranovski // *IEEE ITSC (2006, September 17–20). Toronto, Canada.* [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.kermetico.com/docs/Manuscript\\_ITSC\\_2006.pdf](http://www.kermetico.com/docs/Manuscript_ITSC_2006.pdf).
31. *Matthews S.* Single impact erosion studies of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating: the role of microstructure variation / S. Matthews, M. Hyland, B. James // *Proceedings of ITSC 2008, Maastricht, The Netherlands.* – 2008. – P. 1371–1378.
32. *Кисель В. М.* Высокоскоростное воздушно-топливное напыление — современный метод нанесения жаро- и износостойких металлических и композиционных покрытий / В. М. Кисель, Ю. И. Евдокименко, В. Х. Кадыров, Г. А. Фролов // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2007. – № 8 (44). – С. 31–35.

33. Балдаев Л. Х. Эффективность применения современных методов газотермического напыления для защиты оборудования химической промышленности от коррозии и изнашивания / Л. Х. Балдаев, С. Л. Балдаев и др. // Химическая техника. – 2007. – № 11. – С. 32–33.
34. Лурье А. З. В. Защита от коррозии нефтегазового оборудования и сооружений методами газотермического напыления / А. З. Лурье, В. В. Гераськин // Коррозия ТНГ. – 2008. – 1 (9). С. 46–56.
35. Kawahara Yu. Application of high temperature corrosion-resistant materials and coatings under severe corrosive environment in waste-to-energy boilers / Journal of Thermal Spray Technology. – 2007. Vol. 16. – № 2. – P. 202–213.
36. Евдокименко Ю. И. Высокоскоростное газопламенное напыление порошковых алюминиевых защитных покрытий / Ю. И. Евдокименко, В. М. Кисель, В. Х. Кадыров // Порошковая металлургия. 2001. – № 3/4. – С. 30–37.
37. Голдаев И. П. Основы теории газоструйных инструментов / В кн.: Новые физические методы разрушения минеральных сред. – Л.: Недра. – 1970. – С. 66–75.
38. Кисіль В. М. Термоабразивне очищення та високошвидкісне повітряно-паливне нанесення антикорозійних покриттів на великогабаритні об'єкти / Кисіль В. М., Євдокименко Ю. І. та ін. // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. Збірник наукових статей. – ІЕЗ НАН України. – Київ, – 2006. – С. 361–364.
39. Gorlach I. A. Development of the Thermal Spraying Process for Anticorrosion Surface Protection // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2008. 19–21 March, 2008, Hong Kong. – Vol. II IMECS 2008. – P. 1831–1836.
40. Withy B. P. The Effect of Substrate Parameters on the Morphology of Thermally Sprayed PEEK Splats // The University of Auckland, New Zealand/ – 2008. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://researchspace.auckland.ac.nz/feedback>
41. Официальный сайт компании Coaken Techno Co., Ltd. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [www.coaken-techno.co.jp](http://www.coaken-techno.co.jp)
42. Официальный сайт группы компаний ТСЗП. Электронный ресурс. Режим доступу: [www.tspc.ru](http://www.tspc.ru).
43. Gorlach I. A. The Application of HVOF for Thermal Spraying of Hard Coatings // R & D Journal of the South African Institution of Mechanical Engineering. – 2009. – № 25. – P. 40–43.
44. Пат. 55558 Україна. Пристрій для газотермічного напилення порошкових матеріалів // Євдокименко Ю.І., Кадиров В.Х., Кисіль В.М. – Промислова власність. – 2003. – № 4.
45. Евдокименко Ю. И. Высокоскоростное газопламенное напыление двухкамерными горелочными устройствами / Ю. И. Евдокименко, В. М. Кисель, В. Х. Кадыров и др. // Порошковая металлургия. – 2003. - № 11/12. – С. 45–54.