

УДК 621.793

Холодное газодинамическое напыление алюминиевого покрытия на эрозионно нестойкий материал*

В.С. Шикалов, С.В. Клинков, В.Ф. Косарев

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: vkos@itam.nsc.ru

Впервые представлены результаты экспериментальных исследований по нанесению методом холодного газодинамического напыления алюминиевых дорожек на поверхность хрупкого эрозионно нестойкого материала (подобного кирпичу) с помощью звукового сопла. Измерены скорости частиц вблизи оси двухфазной струи и предложена аппроксимирующая формула, описывающая зависимость скорости частиц от давления и температуры торможения ускоряющего воздуха. Проведены исследования взаимодействия двухфазной струи с поверхностью подложки и показано, что с увеличением температуры торможения газа процесс эрозии подложки переходит в процесс образования покрытия. Найдены параметры, которые могут быть рекомендованы в качестве рабочих при практическом напылении.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, эрозия, профиль покрытия, звуковое сопло.

Введение

Метод холодного газодинамического напыления (ХГН) изначально применялся для получения покрытий на материалах, которые не склонны к существенной эрозии под действием сверхзвуковой двухфазной струи (например, на металлах и твердых керамиках). Факт увеличения коэффициента напыления с ростом скорости удара частиц привел к выработке концепции, согласно которой признано необходимым придание частицам максимально возможной скорости [1]. В связи с этим для ускорения частиц в ХГН применяются сверхзвуковые сопла Лаваля, высокие давления торможения (до 4 МПа) и в некоторых случаях легкие газы (например, гелий).

Отдельного внимания при изучении ХГН заслуживает проблема нанесения металлических покрытий на эрозионно нестойкие материалы, которые можно условно разделить на два класса. К первому классу относятся полимеры и композиты на их основе, проблеме металлизации которых стали уделять внимание сравнительно недавно [2–11]. В большинстве случаев получать покрытия на полимерах удастся путем напыления тонких подслоев металлов [2, 5–7, 9, 10], в том числе комбинируя ХГН с другими методами [5, 9].

* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (проекты АААА-А17-117030610124-0 и АААА-А19-119051590004-5) и гранта РФФИ № 19-08-00538 с использованием оборудования ЦКП «Механика» (ИТ-ПМ СО РАН).

Однако единого взгляда на этот процесс среди исследователей до настоящего времени не сложилось. Следует отметить, что в приведенных выше работах эксперименты по напылению осуществлялись по классической схеме: частицы ускорялись в соплах Лавала при высоких давлениях торможения. Ко второму классу эрозионно нестойких материалов можно отнести кирпич, бетон и другие подобные материалы. В их состав входят такие твердые керамики как Al_2O_3 и SiO_2 , которые вместе со связующим веществом формируют рыхлый и пористый материал. На сегодняшний день в литературе отсутствуют сведения касательно применимости метода ХГН для металлизации данного типа материалов.

Отметим, что алюминиевые покрытия на металлических подложках (сталь, медь и т.д.) могут быть получены в условиях, когда частицы алюминия ускоряются с помощью сверхзвуковых сопел с числом Маха на срезе, равном 2–3, при давлении торможения ускоряющего частицы воздуха 1,5–2 МПа и температуре торможения 500–550 К. Первые попытки металлизации поверхности неметаллических материалов (подобных кирпичу) при вышеперечисленных параметрах показали, что в этих условиях имеет место активный процесс эрозии поверхности подложки. Оценки показали, что скорость удара твердых (нерасплавленных) частиц алюминия в приведенных выше условиях оказывается достаточно высокой (порядка 500–550 м/с), и их взаимодействие с поверхностью хрупких непрочных материалов ведет к достаточно сильной эрозии последних. Сложилось довольно противоречивая ситуация: с одной стороны, для получения покрытий необходимо придать частицам достаточно высокую скорость, а с другой стороны, эрозионная стойкость подложки недостаточна, и получить покрытие на ней методом ХГН не представляется возможным. Исследования, проведенные авторами, показали, что для успешного формирования покрытия на таких материалах необходимо уменьшать скорость удара частиц. В работе [12] было показано, что при напылении с помощью эжекторных сопел эрозионно-адгезионный переход на подобных материалах наблюдается при скорости частиц алюминия около 385 м/с (при температуре торможения ускоряющего воздуха 570 К и давлении торможения 1,5 МПа). Было сделано предположение, что если далее снижать давление торможения ускоряющего газа, то эрозионно-адгезионный переход может наступить при еще меньших скоростях удара частиц. Дальнейшие эксперименты было решено проводить в характерном диапазоне давлений торможения 0,25–0,5 МПа. Однако при таких низких давлениях торможения использование типичных сверхзвуковых сопел затруднительно из-за возникновения отрыва потока от стенок сопла. Применение звуковых сопел, в которых скорость истечения газа достигает скорости звука на срезе, позволяет существенно уменьшить давление торможения газа без эффекта отрыва потока внутри сопла и, соответственно, снизить скорость напыляемых частиц. В этом случае истечение газа происходит в режиме недорасширения, т.е. когда статическое давление в потоке на срезе сопла выше атмосферного и составляет для воздуха 0,528 от давления торможения. Это приводит к расширению струи на начальном участке («бочке») и ускорению газа до сверхзвуковых скоростей не в сопле, а в струе.

Результаты экспериментальных исследований по напылению алюминиевых дорожек на поверхность хрупких эрозионно нестойких материалов (подобных кирпичу) с помощью звукового сопла впервые были представлены в работе [13]. Настоящая работа является продолжением этих исследований.

Материалы и методики экспериментов

Эксперименты проводились на стенде ХГН, основными элементами которого являлись пыле- и шумозащитная камера напыления, дозатор порошка барабанного типа, нагреватель газа и форкамерно-сопловой узел. В качестве системы позиционирования сопла использовался 6-осевой робот KR 16-2 (KUKA, Германия) (рис. 1).

Напыление осуществлялось с помощью звукового сопла, схема которого представлена на рис. 2. Сопло состояло из форкамеры постоянного сечения диаметром 16 мм

Рис. 1. Нагреватель и сопловой узел на роботе-манипуляторе в камере напыления.



и длиной 110 мм, а также сужающегося под углом 20° участка длиной 20 мм с выходным диаметром 6 мм. Были выбраны два режима: с давлениями 0,25 и 0,5 МПа, на каждом из которых напылялись одиночные дорожки при разной температуре торможения рабочего газа, варьировавшейся в пределах 433–573 К.

Дистанция от среза сопла до поверхности подложки была одинаковой во всех экспериментах и равнялась 30 мм, сопло двигалось относительно подложки со скоростью 5 мм/с. В качестве подложек для напыления использовались плоские прямоугольные образцы из красного керамического кирпича размером $60 \times 50 \times 12$ мм (рис. 3).

Напыляемый порошок — алюминий АСД-1 (рис. 4а) — со средним диаметром частиц d_{pm} , примерно равным 30 мкм, со стандартным отклонением SD, составляющим около 15 мкм. Микрофотография частиц порошка и функция распределения их по размерам, полученная с помощью дифракционного анализатора частиц LS 13 320 (Beckman Coulter, США) представлены на рис. 4. Здесь f_v — дифференциальная кривая и F_v — интегральная кривая частиц по размерам. Расход порошка во всех экспериментах оставался одинаковым и равным 0,4 г/с.

Профили дорожек взаимодействия двухфазного потока с поверхностью подложки измерялись с помощью бесконтактного интерференционного профилометра ContourGT-K1 (Bruker Corporation, США) с программным пакетом Vision64. Профили усреднялись на длине дорожки, равной 20 мм.

Экспериментальные данные по скорости частиц вблизи оси струи были получены с помощью стенда трехимпульсной теневой диагностики, подробно описанного в работе [14].

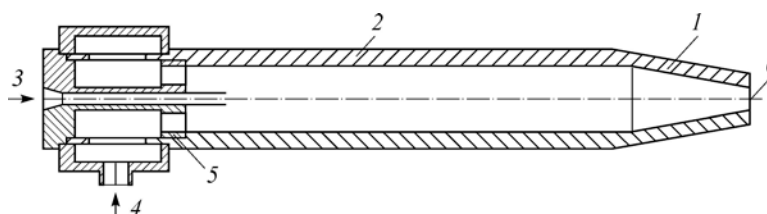
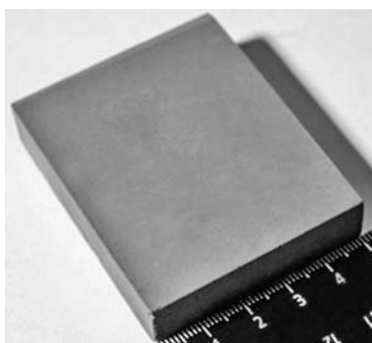


Рис. 2. Схема звукового сопла, используемого в ХГН.

1 — сужающийся участок, 2 — форкамера, 3 — подача порошка, 4 — подача газа, 5 — хоникомб, 6 — выходное сечение.



Параметры измерения соответствовали параметрам экспериментов по напылению. При каждой температуре измерялись скорости 100–200 частиц, затем вычислялась средняя скорость по всей выборке. Ошибка среднего в каждой точке составила не более 5 м/с.

Рис. 3. Внешний вид образцов для напыления.

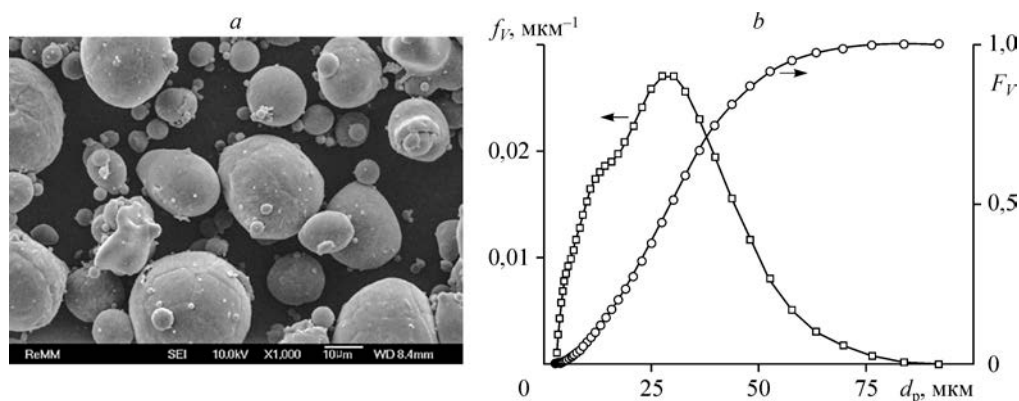


Рис. 4. Фотография порошка АСД-1, полученная с помощью растровой электронной микроскопии (а), и его объемное распределение по размерам (б) при $d_{pm} = 32,1$ мкм и $SD = 15,6$ мкм.

Экспериментальные результаты

Скорость частиц

Частицы порошка алюминия, используемого в напылении, имеют достаточно крупный размер (30 мкм), поэтому скорость их удара о подложку можно оценивать по их скорости в свободной струе на расстоянии, равном расстоянию от среза сопла до поверхности подложки (в данном случае 30 мм), предполагая, что они не тормозятся в ударно-сжатом слое газа, возникающем перед поверхностью подложки при натекании на нее сверхзвуковой струи. Результаты измерений (рис. 5) показывают, что скорости частиц в струях, истекающих из звукового сопла, оказываются существенно ниже (более чем на 150 м/с) скоростей частиц, ускоренных в сопле Лавалья при высоких давлениях, что и позволяет снизить эрозионное воздействие частиц на подложку. На рисунке видно, что при увеличении давления в форкамере от 0,25 до 0,5 МПа скорость частиц увеличивается примерно на 30–40 м/с. Увеличение температуры на 140 К (от 433 до 573 К) при обоих давлениях дает прирост скорости примерно на такую же величину (~ 40 м/с).

Для оценки скоростей частиц при давлениях и температурах, отличных от тех, при которых были проведены измерения, необходимо построить подходящую аппроксимирующую формулу в виде зависимости скорости частиц от давления торможения и температуры торможения ускоряющего газа. Для этого воспользуемся полученным ранее выражением, верификация которого была проведена для условий ускорения частиц в сверхзвуковых соплах [1, 15]:

$$v_p = \frac{u_{ex}}{1 + 0,85 \sqrt{\frac{\rho_p d_p u_{ex}^2}{p_0 L}}}, \quad (1)$$

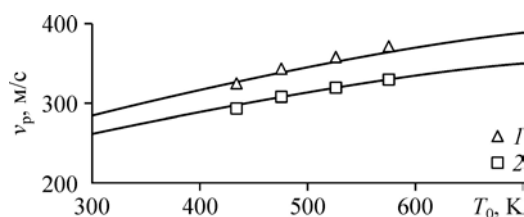


Рис. 5. Зависимость скорости частиц вблизи оси струи, истекающей из звукового сопла с диаметром выходного сечения $d_{ex} = 6$ мм, от температуры торможения T_0 .
 $p_0 = 0,5$ (1), $0,25$ (2) МПа, сплошные линии — аппроксимации.

здесь u_{ex} — скорость газа на выходе из сопла, d_p — диаметр частиц, L — длина сверхзвукового участка сопла, ρ_p — плотность материала частиц, p_0 — давление торможения.

Как известно, скорость газа растет с увеличением температуры в форкамере как $u_{\text{ex}} \sim \sqrt{T_0}$. Подставляя эту зависимость в формулу (1), получим

$$v_p \sim \frac{\sqrt{T_0}}{1 + b\sqrt{T_0/p_0}}. \quad (2)$$

Выберем некоторые конкретные значения температуры (T_{01}) и давления (p_{01}) в форкамере, при которых была измерена скорость частиц v_{p1} , назовем эти величины референтными. Введем эти параметры в формулу (2) так, чтобы в ней присутствовали отношения давлений и температур, как показано ниже:

$$v_p = v_{p1} \frac{a\sqrt{T_0/T_{01}}}{1 + b\sqrt{\frac{T_0}{T_{01}} \cdot \frac{p_{01}}{p_0}}}. \quad (3)$$

Если подставить референтные параметры, то получим формулу связи параметров a и b : $1 = a/(1+b)$ или $a = 1+b$, подставив которую в выражение (3), получим окончательное соотношение

$$v_p = v_{p1} \frac{(1+b)\sqrt{T_0/T_{01}}}{1 + b\sqrt{\frac{T_0}{T_{01}} \cdot \frac{p_{01}}{p_0}}}. \quad (4)$$

Таким образом, необходимо найти, используя данные измерений, только один параметр. Это можно осуществить, если взять данные измерений скорости частиц v_{p2} при каких-нибудь других значениях давления p_{02} и температуры T_{02} . Подставив их в формулу (4), получим

$$v_{p2} = v_{p1} (1+b) \sqrt{T_{02}/T_{01}} / \left(1 + b \sqrt{\frac{T_{02}}{T_{01}} \cdot \frac{p_{01}}{p_{02}}} \right). \quad (5)$$

Преобразовав (5), запишем

$$b = \frac{v_{p2}/v_{p1} - \sqrt{T_{02}/T_{01}}}{\sqrt{\frac{T_{02}}{T_{01}} \left(1 - \frac{v_{p2}}{v_{p1}} \sqrt{\frac{p_{01}}{p_{02}}} \right)}}. \quad (6)$$

На рис. 5 сплошными линиями показаны результаты расчета, когда в качестве первых (референтных) значений параметров были выбраны результаты измерений при давлении 0,25 МПа и температуре 473 К, а в качестве вторых — результаты измерений при давлении 0,25 МПа и температуре 573 К. При этом значение коэффициента b оказалось равным 0,45. Видно, что получено неплохое совпадение аппроксимирующих кривых с экспериментальными точками. Это позволяет проводить оценку скорости частиц при любых значениях давления и температуры в форкамере в пределах некоторой окрестности области измерения.

Дорожки напыления

На рис. 6а приведена фотография дорожек взаимодействия двухфазной струи с поверхностью подложки, полученных при давлении в форкамере 0,25 МПа, а на рис. 6б — их соответствующие усредненные профили. Можно видеть (кривая 1 на рис. 6б),

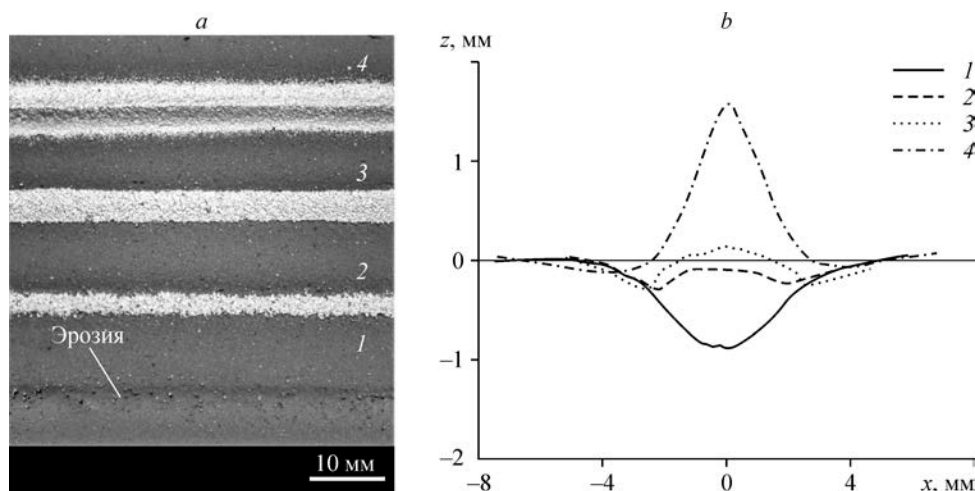


Рис. 6. Дорожки взаимодействия двухфазного потока с поверхностью подложки (вид сверху) (а) и их усредненные профили (b) при $d_{ex} = 6$ мм, $p_0 = 0,25$ МПа.

1 — $T_0 = 433$ К, $v_p \approx 290$ м/с, 2 — $T_0 = 473$ К, $v_p \approx 310$ м/с,
3 — $T_0 = 523$ К, $v_p \approx 320$ м/с, 4 — $T_0 = 573$ К, $v_p \approx 330$ м/с.

что при температуре 433 К наблюдается только эрозия подложки глубиной несколько меньше 1 мм, закрепившихся частиц нет. Закрепление частиц на поверхности подложки начинается при температуре рабочего газа 473 К. При этом образуется зона эрозии подложки шириной около 9 мм и глубиной около 0,3 мм (кривая 2 на рис. 6b), в которой формируется дорожка покрытия из алюминия. При повышении температуры коэффициент напыления начинает расти, ширина и высота дорожки покрытия увеличиваются. При температуре 573 К формируется дорожка покрытия с клиновидным профилем высотой примерно ~ 1,5 мм и шириной ~ 6 мм, глубина эрозии при этом оказывается заметно меньше (кривая 4 на рис. 6b).

Примеры фотографий поперечного сечения дорожек взаимодействия двухфазного потока с поверхностью подложки, полученных с помощью оптического микроскопа AxioScoreA1 (Германия), показаны на рис. 7. Можно видеть, что покрытие образуется на слегка эродированной поверхности подложки, причем зона эрозии шире покрытия.

На рис. 8 показаны результаты экспериментов при давлении ускоряющего воздуха в форкамере 0,5 МПа. В диапазоне температур торможения 433–523 К наблюдается эрозия

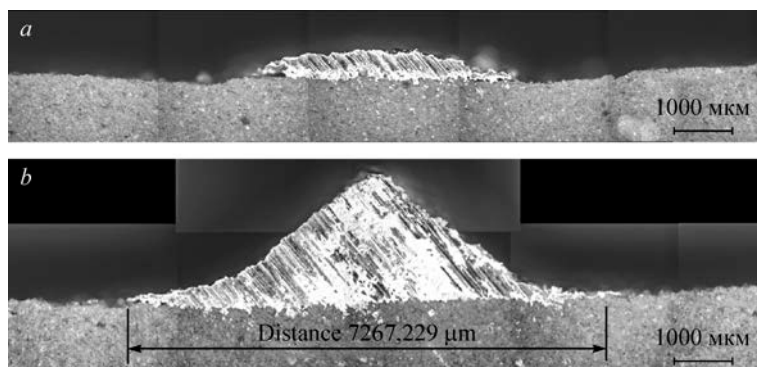


Рис. 7. Фотографии поперечного сечения дорожек взаимодействия двухфазного потока с поверхностью подложки при температурах торможения ускоряющего воздуха 523 (а) и 573 К (b).

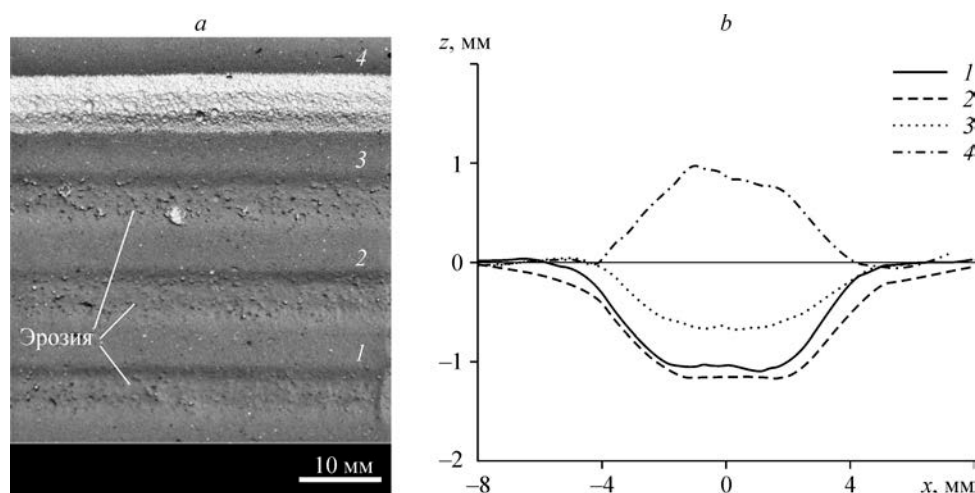


Рис. 8. Дорожки взаимодействия двухфазного потока с поверхностью подложки (вид сверху) (а) и их усредненные профили (b) при $d_{ex} = 6$ мм, $p_0 = 0,5$ МПа.

1 — $T_0 = 433$ К, $v_p \approx 320$ м/с, 2 — $T_0 = 473$ К, $v_p \approx 340$ м/с,
3 — $T_0 = 523$ К, $v_p \approx 360$ м/с, 4 — $T_0 = 573$ К, $v_p \approx 370$ м/с.

подложки (рис. 8a). Максимальная глубина эрозии оказывается несколько больше 1 мм (кривые 1 и 2 на рис. 8b), т.е. подложка сильнее эродирует при более высоком давлении торможения рабочего газа, что может быть связано с более высокими скоростями частиц (в этом случае примерно на 30 м/с). Следует отметить, что при температуре 523 К одновременно с эрозией, имеющей теперь уже меньшую глубину — $\sim 0,7$ мм (кривая 3 на рис. 8b), начинают зарождаться отдельные кластеры покрытия. Сплошное покрытие формируется при температуре 573 К, дорожка покрытия высотой ~ 1 мм и шириной ~ 8 мм при этом имеет трапецевидную форму.

Обсуждение

Следует отметить, что дорожки взаимодействия двухфазной струи с поверхностью подложки при давлении 0,5 МПа несколько шире, чем при давлении 0,25 МПа. Эта особенность может быть связана с более высокой степенью нерасчетности струи (как известно, диаметр первой бочки, который в первом приближении можно принять за характерный диаметр струи, пропорционален корню квадратному из нерасчетности). Возникающие в струе радиальные скорости приводят к расширению потока частиц, что, в свою очередь, приводит, с одной стороны, к формированию более широких дорожек, а с другой стороны, к более плавному распределению частиц, что сказывается и на профилях дорожек, это можно видеть при сравнении кривых на рис. 6b и 8b.

Во всех рассмотренных случаях с увеличением температуры торможения газа процесс эрозии подложки переходит в процесс образования покрытия. Из рис. 7 можно видеть, что покрытие образуется на слегка эродированной поверхности подложки, причем зона эрозии шире покрытия. Это позволяет предположить, что первые ударяющие частицы производят эрозию прежде, чем начинает формироваться покрытие, и только после того, как поверхность подложки подвергается определенному количеству ударов частиц (на единицу площади), начинает формироваться покрытие. Этот факт известен из более ранних экспериментов по напылению алюминия на стальные и медные подложки с помощью сверхзвуковых сопел [1, 15]. В рассматриваемом случае предварительные удары частиц приводят к заметной эрозии, чего не наблюдалось при напылении на металлические подложки. Образование покрытия начинается вблизи оси сопла (трек 2 на рис. 6a),

постепенно ширина его увеличивается с ростом температуры торможения (треки 3 и 4 на рис. 6а). Это можно объяснить тем, что концентрация и скорость частиц имеют неравномерное распределение по сечению струи (с максимумом на оси сопла и постепенным падением к периферии). В тех местах, где количество предварительных ударов было недостаточным для начала формирования покрытия, остается эродированная область. После того как на поверхности подложки образуется покрытие некоторой толщины, оно начинает защищать подложку от дальнейшей эрозии.

Следует обратить внимание на тот факт, что глубина эрозии с увеличением температуры торможения рабочего газа уменьшается несмотря на рост скорости удара частиц. Это, на первый взгляд, противоречит общеизвестной закономерности, согласно которой масса эрозии увеличивается примерно как квадрат скорости удара частиц [16]. Можно предположить, что при ударе часть частиц закрепляется на поверхности подложки, а другая часть производит эрозию. Закрепившиеся частицы, с одной стороны, предохраняют подложку от эрозии, а с другой стороны, эта часть частиц вычитается из общего числа, так что доля частиц, которые вызывают эрозию, уменьшается. И тот и другой эффект, очевидно, будут приводить к уменьшению эрозии. Следы такого процесса видны на дорожке 3 на рис. 8а. Заметим, что кластеры из закрепившихся частиц могут в общем случае однажды образовавшись, остаться на поверхности, или через какое-то время разрушиться, и вместо них могут образовываться кластеры в других местах.

Согласно представленным экспериментальным данным переход к образованию покрытия при более высоком давлении торможения происходит при более высокой температуре торможения. Следует заметить, что температура торможения газа влияет как на скорость частиц, так и на их температуру, в то время как давление торможения влияет преимущественно только на скорость частиц. Температура торможения газа также определяет и температуру поверхности подложки. Можно предположить, что более высокие температуры частиц и подложки приводят к более благоприятным условиям для закрепления частиц и, соответственно, к меньшей эрозии в силу сделанного выше предположения. При одинаковой температуре торможения более высокому давлению торможения соответствует большая эрозия в силу более высоких скоростей удара частиц. Следовательно, можно ожидать, что эрозионно-адгезионный переход при более высоком давлении торможения должен наступить при более высокой температуре торможения при условии, что скорости удара частиц лежат в благоприятном диапазоне. Если скорости частиц слишком высоки, то будет наблюдаться только эрозия, если слишком малы, то частицы не смогут закрепиться в силу недостаточной их деформации при ударе (для возникновения адгезии частицы должны достаточно плотно прижаться к поверхности подложки), несмотря на то, что эрозия также уменьшится.

Минимальная скорость частиц, при которой наблюдается формирование покрытия, составляет 310 м/с (при температуре торможения 473 К и давлении торможения 0,25 МПа). Однако более продуктивно процесс напыления идет при более высоких температурах торможения (573 К) и скоростях частиц 330–370 м/с, соответствующих давлениям торможения 0,25–0,5 МПа. При этих параметрах эрозия подложки оказывается также заметно ниже. Данные режимы могут быть рекомендованы в качестве рабочих при практическом напылении.

Заключение

В работе впервые представлены результаты экспериментальных исследований по нанесению методом холодного газодинамического напыления алюминиевых дорожек на поверхность хрупких эрозионно нестойких материалов (подобных кирпичу) с помощью звукового сопла. Измерены скорости частиц вблизи оси двухфазной струи и предложена аппроксимирующая формула, описывающая зависимость скорости частиц от давления и температуры торможения ускоряющего воздуха в диапазонах 290 – 370 м/с, 0,25 – 0,5 МПа

и 433 – 573 К соответственно. В этих же диапазонах параметров проведены исследования взаимодействия двухфазной струи с поверхностью подложки и показано, что с увеличением температуры торможения газа процесс эрозии подложки переходит в процесс образования покрытия. Обнаружено, что несмотря на рост скорости удара частиц глубина эрозии с увеличением температуры торможения рабочего газа уменьшается. Предложена гипотеза, объясняющая такое уменьшение за счет образования кластеров из закрепившихся частиц, защищающих подложку от эрозии. Найдены параметры, которые могут быть рекомендованы в качестве рабочих при практическом напылении.

Список литературы

1. Papyrin A., Kosarev V., Klinkov S., Alkhimov A., Fomin V. Cold spray technology. Amsterdam: Elsevier Science, 2007. 336 p.
2. Robitaille F., Yandouzi M., Hind S., Jodoin B. Metallic coating of aerospace carbon/epoxy composites by the pulsed gas dynamic spraying process // Surface & Coatings Technology. 2009. Vol. 203, No. 19. P. 2954–2960.
3. Lupoi R., O'Neill W. Deposition of metallic coatings on polymer surfaces using cold spray // Surface & Coatings Technology. 2010. Vol. 205, No. 7. P. 2167–2173.
4. Zhou X.L., Chen A.F., Liu J.C., Wu X.K., Zhang J.S. Preparation of metallic coatings on polymer matrix composites by cold spray // Surface & Coatings Technology. 2011. Vol. 206, No. 1. P. 132–136.
5. Affi J., Okazaki H., Yamada M., Fukumoto M. Fabrication of aluminum coating onto CFRP substrate by cold spray // Materials Transactions. 2011. Vol. 52, No. 9. P. 1759–1763.
6. Ganesan A., Affi J., Yamada M., Fukumoto M. Bonding behavior studies of cold sprayed copper coating on the PVC polymer substrate // Surface and Coatings Technology. 2012. Vol. 207. P. 262–269.
7. Ganesan A., Yamada M., Fukumoto M. Cold spray coating deposition mechanism on the thermoplastic and thermosetting polymer substrates // J. Thermal Spray Technology. 2013. Vol. 22, No. 8. P. 1275–1282.
8. Ye H., Wang J. Preparation of aluminum coating on Lexan by cold spray // Materials Letters. 2014. Vol. 137. P. 21–24.
9. Archambault G., Jodoin B., Gaydos S., Yandouzi M. Metallization of carbon fiber reinforced polymer composite by cold spray and lay-up molding processes // Surface & Coatings Technology. 2016. Vol. 300. P. 78–86.
10. Che H., Vo P., Yue S. Metallization of carbon fibre reinforced polymers by cold spray // Surface & Coatings Technology. 2017. Vol. 313. P. 236–247.
11. Che H., Chu X., Vo P., Yue S. Metallization of various polymers by cold spray // J. Thermal Spray Technology. 2018. Vol. 27, No. 1–2. P. 169–178.
12. Shikalov V.S., Klinkov S.V., Kosarev V.F. Cold spraying on materials with low erosion resistance // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1770. P. 040015.
13. Shikalov V.S., Klinkov S.V., Kosarev V.F. Low pressure cold spraying on materials with low erosion resistance // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1893. P. 030038.
14. Клишков С.В., Косарев В.Ф., Ряшин Н.С. Сравнение результатов экспериментов и моделирования холодного газодинамического напыления за маской. Ч. 2 // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 2. С. 221–232.
15. Алхимов А.П., Клишков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика / Под ред. В.М. Фомина. М.: Физматлит, 2010. 536 с.
16. Алхимов А.П., Клишков С.В., Косарев В.Ф., Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В. Гетерогенные технологии: проблемы взаимодействия частиц с преградой // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 3. С. 415–432.

*Статья поступила в редакцию 18 февраля 2019 г.,
после доработки — 18 февраля 2019 г.,
принята к публикации 26 апреля 2019 г.*