

УДК 621.793

Влияние температуры газа и скорости перемещения сопла на коэффициент напыления при ХГН*

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

Изучается влияние температуры торможения ускоряющей частицы газа и скорости перемещения сопла на коэффициент напыления при нанесении одиночных дорожек медного покрытия методом холодного газодинамического напыления. Проведенные эксперименты наглядно показывают, что скорость перемещения сопла существенно влияет на результаты измерений коэффициента напыления: чем она выше, тем меньше оказывается измеренное значение при прочих равных условиях. Такое поведение может быть объяснено тем, что первые удары частиц не приводят к их закреплению на поверхности и, соответственно, к росту покрытия. При этом известно, что прежде, чем покрытие начнет расти, необходимо, чтобы поверхность подложки подверглась достаточному количеству ударов частиц. Эта подготовительная стадия получила название активационной стадии или стадии задержки (индукции) напыления. В работе впервые показано, что удельная (на единицу площади) масса израсходованного порошка на этой активационной стадии зависит от температуры торможения ускоряющей частицы газа: чем выше температура, тем меньше удельная масса.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, активация поверхности, критическая скорость перемещения сопла.

Введение

Образование покрытий из нерасплавленных частиц впервые экспериментально наблюдалось в начале 1980-х годов в ИТПМ СО РАН при обтекании затупленных тел сверхзвуковым потоком воздуха, в котором присутствовали частицы металлов. На основе этого был разработан инновационный метод получения покрытий, сегодня известный как метод холодного газодинамического напыления [1 – 3]. Первые экспериментальные исследования показали, что покрытия начинают формироваться в условиях, когда скорость частиц превосходит некоторое пороговое значение, так называемую критическую скорость [4]. Причем чем больше скорость частиц превышает пороговое значение, тем выше коэффициент напыления. Также было обнаружено, что покрытия начинают образовываться не сразу, а с некоторой задержкой во времени, которое назвали временем индукции [5]. Было установлено, что время индукции уменьшается с ростом скорости частиц, причем при некоторой скорости оно становится равным нулю. В этих экспериментах в качестве ускоряющего алюминиевые частицы газа использовались смеси

* Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 19-08-00538 с использованием оборудования ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН).

воздуха с гелием. Было получено, что с увеличением содержания гелия в смеси возрастает скорость истечения смеси и соответственно растет скорость частиц. Смесь газов не подогревалась, так что температура подложки была близкой к комнатной независимо от того, в каком соотношении газы смешивались, и, соответственно, от того, с какой скоростью частицы сталкивались с подложкой. В работе [6] было показано, что время индукции может влиять на результаты измерения коэффициента напыления. Это связано с тем, что за время индукции расходуется некоторая масса порошка, которая не вносит никакого вклада в покрытие. Поэтому если масса частиц, израсходованных за все время эксперимента по определению коэффициента напыления, оказывается сравнимой с массой, необходимой для активации, то измерение становится некорректным. Для корректного измерения необходимо соблюдать условие, что масса израсходованного порошка должна намного превышать ту начальную массу порошка, которая расходуется за время индукции.

Авторами также были проведены эксперименты, в которых частицы ускорялись подогретым воздухом (без добавления гелия) [1, 7, 8]. Хотя в этих экспериментах влияние подгрева газа на время индукции не изучалось, однако они позволили установить, что существует некоторая минимальная температура подгрева газа, при которой начинает формироваться покрытие, причем чем больше температура газа превосходит эту минимальную температуру, тем выше коэффициент напыления. При этом критическая скорость частиц оказывается меньше, чем в случае ускорения их неподогретой смесью воздуха с гелием [1]. Увеличение температуры газа повышает скорость его истечения и соответственно скорость частиц, а также температуру частиц и поверхности подложки в пятне напыления. Таким образом, снижение критической скорости связано с увеличением как скорости и температуры частиц, так и температуры подложки.

Первые исследования по изучению влияния температуры подложки на критическую скорость частиц проводились в ИТПМ СО РАН [9]. Был получен принципиально важный результат: в условиях, когда ускоряющий алюминиевые частицы газ (воздух) не подогревался, а подогревалась подложка, то при температуре подложки около 700 К наблюдалось образование покрытия. Таким образом, было подтверждено, что подгрев подложки снижает критическую скорость эрозионно-адгезионного перехода. Другими словами, в этом случае частицы могут формировать покрытие при более низкой скорости удара и при более низкой своей температуре (по оценкам около 260 К). Влияние температуры подложки на процесс ХГН также изучалось в работах [10–20]. Из этих работ можно сделать следующие выводы. Если сопло неподвижно, то температура подложки в месте натекания струи достигает некоторого максимального значения, которое всегда ниже температуры торможения. При увеличении толщины и/или теплопроводности подложки эта максимальная температура уменьшается. Если сопло движется, то температура подложки под струей (в пятне напыления) заметно уменьшается с ростом скорости перемещения сопла. Подгрев подложки может приводить к увеличению доли закрепившихся частиц, адгезии, плотности и электропроводности покрытий, уменьшению остаточных напряжений и микротвердости.

Влияние скорости перемещения сопла (и/или расхода порошка) на коэффициент напыления изучалось в работах [21–27], подробный обзор которых представлен в работе [28]. Полученные результаты показали, что с увеличением скорости перемещения сопла может наблюдаться монотонный рост или, наоборот, падение коэффициента напыления, а также его немонотонное изменение с максимумом [22]. Наличие времени индукции [5, 6, 21, 22] и уменьшение температуры поверхности подложки [23] является причиной уменьшения коэффициента напыления с увеличением скорости перемещения сопла. Изменение угла удара частиц (отклонение от нормального) является причиной уменьшения коэффициента напыления при уменьшении скорости перемещения сопла [24]. В работе [22] было сделано

предположение, что в этом случае увеличение эрозии является причиной уменьшения коэффициента напыления, хотя объяснений причин увеличения эрозии авторы не приводят.

При увеличении расхода порошка снижается скорость частиц [25–27]. Например, при 10-процентной загрузке потока газа частицами (по сравнению с расходом газа) можно ожидать примерно 5-процентное снижение скорости частиц. При еще более высокой загрузке (до 50 %) наблюдается уменьшение скорости частиц на 10–15 %. С увеличением расхода порошка может наблюдаться монотонный рост или, наоборот, падение коэффициента напыления, а также немонотонное его изменение с максимумом. За исключением работы [3], в остальных работах авторы не выдвигают предположений о возможных причинах такого поведения. В работе [3] делается предположение, что слой отскочивших от подложки частиц может быть причиной уменьшения коэффициента напыления при увеличении расхода порошка.

В работе [28] было показано, что для объяснения наблюдаемых закономерностей немонотонного поведения коэффициента напыления достаточно принять во внимание эффект уменьшения угла удара частиц при малых скоростях перемещения сопла (соответственно, высоких расходах порошка) и эффект задержки напыления при высоких скоростях перемещения сопла (и низких расходах порошка). Поскольку стадия задержки напыления остается до сих пор слабо изученной, в представляемой работе предпринята попытка провести измерение коэффициента напыления в зависимости от температуры торможения ускоряющего воздуха в диапазоне высоких скоростей перемещения сопла (100 – 400 мм/с). Именно при высокой скорости перемещения сопла эта стадия оказывает наибольшее влияние на результаты измерения коэффициента напыления.

Экспериментальная установка и методы

Напыление проводилось на установке ХГН, входящей в состав центра коллективного пользования «Механика» ИТПМ СО РАН. Установка для напыления (рис. 1) оснащена 6-осевым промышленным роботом KR 16-2 (KUKA Roboter GmbH, Германия), что позволяет проводить эксперименты с высокой точностью позиционирования и в широком диапазоне скоростей перемещения сопла.

Для напыления медного порошка ПМС-1 применялось профилированное осесимметричное сопло Лавала длиной 150 мм с диаметром критического сечения 2,8 мм и диаметром выходного сечения 6,5 мм. Давление газа (воздуха) и расход порошка во всех экспериментах были одинаковыми и равными соответственно 3 МПа и 2,3 г/с. На рис. 2 показана микрофотография частиц и функции их распределения по размерам. В эксперименте использовались подложки из алюминия (50 мм × 50 мм) толщиной 1 мм, которые прижимались рамкой к стальному основанию. Рамка имела вырез размером 20 мм × 40 мм.

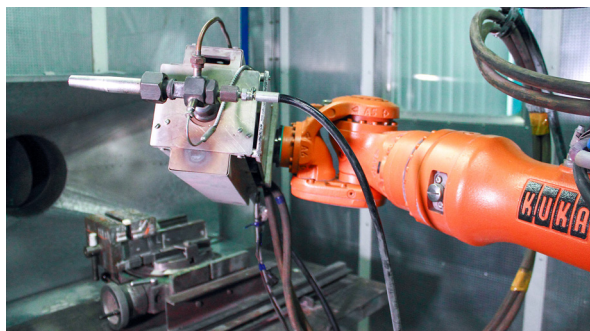


Рис. 1. Нагреватель и сопловой узел на роботe-манипуляторе в камере напыления.

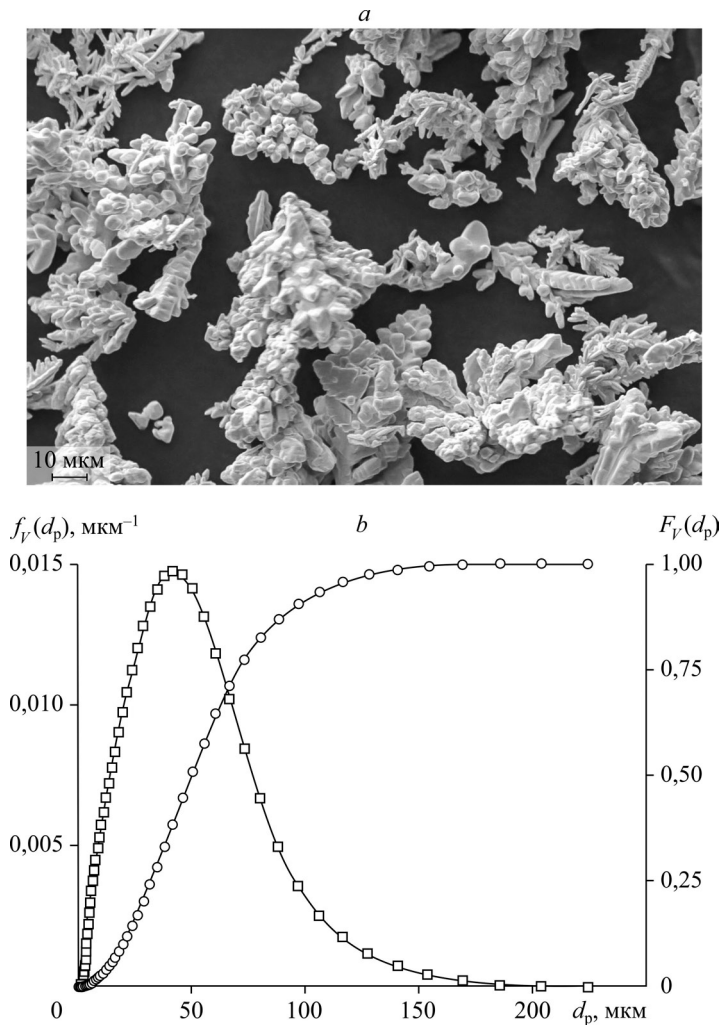


Рис. 2. Фотография (а) и функции распределения по размерам (b) частиц порошка ПМС-1.

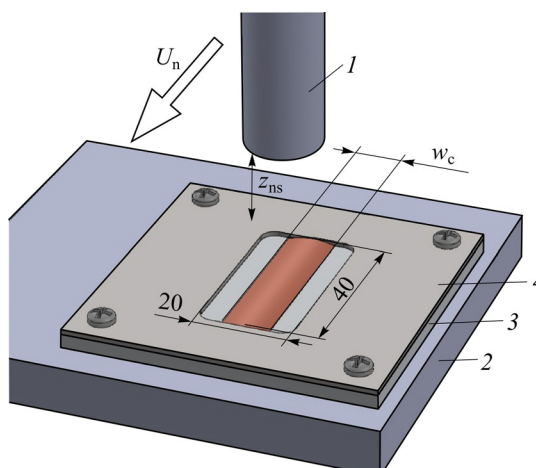
$d_{pm} = 59, 53$ мкм, $SD = 33,29$ мкм; $f_V(d_p)$ и $F_V(d_p)$ — дифференциальная и интегральная функции распределения частиц по размерам, d_{pm} — средний размер частиц, SD — стандартное отклонение.

Ось сопла устанавливалась перпендикулярно поверхности подложки, расстояние от среза сопла до поверхности подложки $z_{нс}$ составляло 30 мм. На рис. 3 представлено схематическое изображение подложки и сопла.

На первой стадии экспериментов было выбрано две температуры торможения воздуха в типичном для получения медных покрытий методом ХГН диапазоне, именно: 400 и 600 °С, а также температура 200 °С, которая близка к минимальной температуре, при которой начинается наращивание медного покрытия. Наличие верхнего предела по температуре торможения связано с тем, что частицы начинают закрепляться на стенках сопла. Это приводит к выходу его из строя и созданию опасной ситуации выхода из строя всей установки в целом. На основании предварительно проведенных экспериментов было выбрано три скорости перемещения сопла: $u_n = 100, 200$ и 400 мм/с. При этих температурах воздуха и скоростях перемещения сопла за один проход сопла наносились одиночные дорожки медных покрытий на алюминиевые подложки (т.е. было получено

Рис. 3. Схема процесса напыления.

1 — сверхзвуковое сопло, 2 — основание, 3 — напыляемая подложка, 4 — прижимная рамка; z_{ns} — расстояние от среза сопла до поверхности подложки, w_c — ширина дорожки напыления, u_n — скорость перемещения сопла.



9 образцов). Затем эта серия экспериментов была проведена еще раз и по двум измерениям вычислены средние значения массы покрытия. Масса покрытия измерялась путем взвешивания образцов до и после напыления на аналитических весах с точностью 10^{-4} г.

Экспериментальные результаты

На рис. 4 приведены примеры полученных медных дорожек напыления на алюминиевой подложке. Видно, что при подогреве воздуха до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ образуется только монослой частиц (сплошное покрытие не формируется). На краях дорожек наблюдаются следы эрозии подложки. Это можно объяснить следующим образом. Во-первых, частицы распределены по радиусу струи неравномерно и, как правило, их концентрация уменьшается от максимальной на оси сопла до нуля на границе струи. Во-вторых, поскольку струя осесимметричная, то время экспозиции/напыления подложки уменьшается

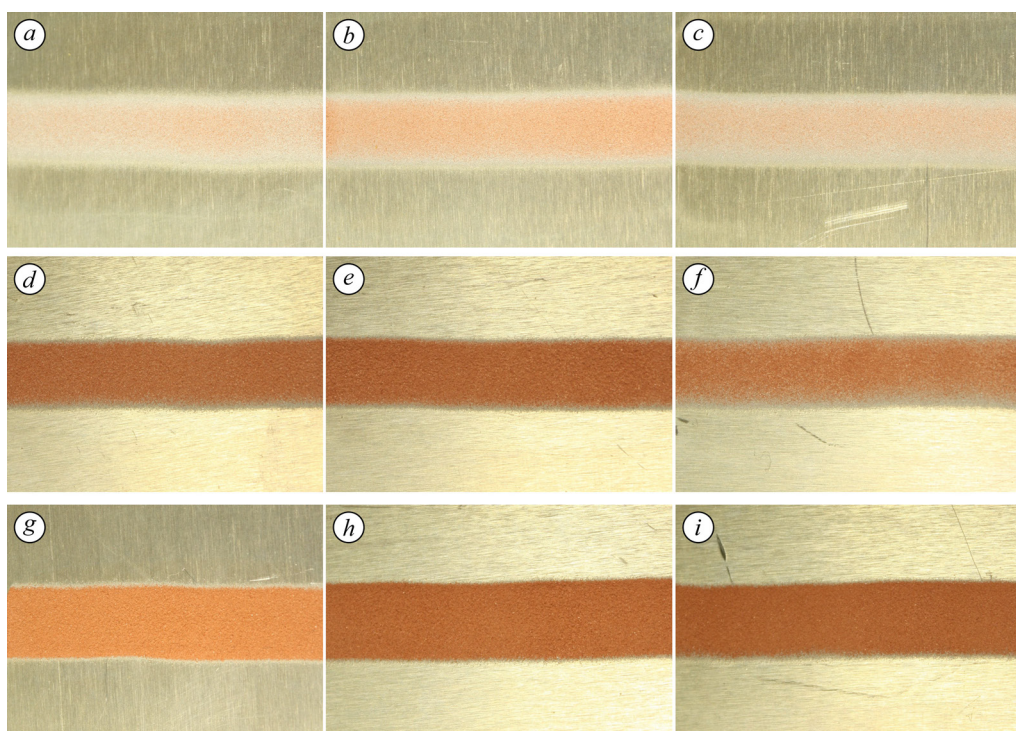


Рис. 4. Вид сверху медных дорожек, напыленных при различных температурах торможения газа и скоростях перемещения сопла.

Длина дорожек напыления 40 мм; a, b, c — $T_0 = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$; d, e, f — $T_0 = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$; g, h, i — $T_0 = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 a, d, g — $u_n = 100\text{ мм/с}$; b, e, h — $u_n = 200\text{ мм/с}$; c, f, i — $u_n = 400\text{ мм/с}$.

Таблица 1

Измеренные массы медных покрытий, г

u_n , мм/с	T_0 , °C		
	200	400	600
	m_c , г		
100	0,0145	0,3032	0,533
	0,0166	0,324	0,547
200	0,0078	0,0766	0,157
	0,0099	0,0503	0,186
400	0,0045	0,0178	0,049
	0,0052	0,0208	0,043

при увеличении расстояния от оси дорожки напыления как $t_c \sim \sqrt{r_n^2 - y^2}$. Оба эти обстоятельства приводят к тому, что масса частиц, попадающих на единицу площади подложки, также уменьшается от максимальной на оси дорожки покрытия до нуля на границе дорожки покрытия. На краях струи масса частиц, попадающая на единицу площади подложки, оказывается меньше той начальной массы, которую необходимо затратить, чтобы начало расти покрытие. Вследствие этого наблюдаются только следы эрозии. В центре струи масса частиц, выпадающих на единицу поверхности подложки, больше, и она оказывается либо сравнима (в случае, когда воздух подогревался до 200 °C) либо больше (при больших температурах подогрева воздуха) необходимой массы порошка для активации. Результаты измерения массы покрытий представлены в табл. 1 и на рис. 5.

Обсуждение

Отметим, что само по себе уменьшение массы покрытия с ростом скорости перемещения сопла (рис. 5) является очевидным фактом, поскольку просто уменьшается время напыления и, соответственно, масса израсходованного порошка. Поэтому чтобы выявить более важные закономерности, требуется провести дополнительную обработку полученных экспериментальных данных. Далее будут представлены последовательно этапы такой обработки и получаемые на каждом этапе результаты. Следует также отметить, что сложившейся теории и, соответственно, методики обработки пока не существует, поэтому все нижеследующее представляется на обсуждение.

Масса израсходованного порошка обратно пропорциональна скорости перемещения сопла (u_n) и может быть представлена выражением

$$m_p = G_p \frac{L_c}{u_n} N_c, \tag{1}$$

здесь G_p — массовый расход порошка, L_c — длина дорожки напыления, N_c — число проходов. В проведенных экспериментах делался один проход, поэтому далее полагаем $N_c = 1$.

Используя общепринятое определение коэффициента напыления (DE) как

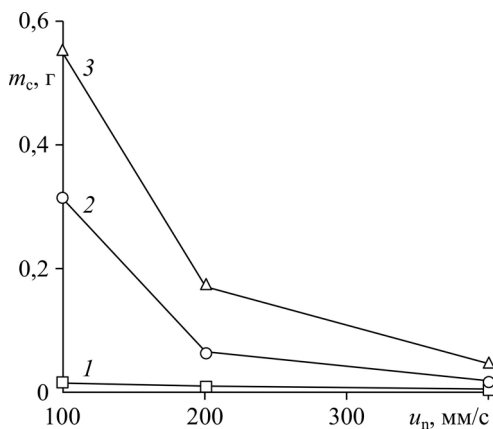


Рис. 5. Зависимость массы покрытия от скорости перемещения сопла. Температуры торможения рабочего газа: 200 (1), 400 (2), 600 (3) °C.

отношение массы покрытия к массе израсходованного порошка, можно записать соотношение

$$DE = \frac{m_c}{m_p} = \frac{m_c}{G_p L_c} u_n \sim m_c u_n. \quad (2)$$

Для последующей обработки экспериментальных данных были выбраны результаты, полученные при температурах торможения воздуха 400 и 600 °С. Авторы не использовали результаты, полученные при $T_0 = 200$ °С, в силу их ненадежности, обусловленной тем, что данная температура близка к минимальной, при которой покрытия начинают формироваться. Типичный диапазон температур торможения воздуха при холодном газодинамическом напылении меди лежит в пределах от 400 до 600 °С, поэтому были выбраны эти две величины. Вычисленные по формуле (2) значения коэффициентов напыления представлены в табл. 2. Эти величины далее использовались для нахождения критических скоростей перемещения сопла путем линейной аппроксимации экспериментальных данных. На рис. 6 приведены зависимость коэффициента напыления DE от скорости перемещения сопла и линейная аппроксимация экспериментальных данных.

Полученные линейные аппроксимации в соответствии с [28] могут быть представлены в виде

$$DE(u_n) = DE_0 \left(1 - \frac{u_n}{u_{ncr}} \right), \quad (3)$$

где DE_0 — коэффициент напыления при нулевой скорости перемещения сопла, u_{ncr} — критическая скорость перемещения сопла (при $u_n \geq u_{ncr}$ покрытие не образуется). Величины коэффициентов линейной аппроксимации представлены в табл. 3. Видно, что они существенно зависят от температуры торможения. В первом приближении внутри интервала 400 – 600 °С и вблизи него были получены следующие линейные зависимости (температура измеряется в °С, скорость в мм/с):

$$DE_0 = \begin{cases} 0, & \text{при } T_0 \leq 180 \text{ °С,} \\ 1,63 \cdot 10^{-3} (T_0 - 180), & \text{при } 180 \leq T_0 \leq 793 \text{ °С,} \\ 1, & \text{при } T_0 \geq 793 \text{ °С,} \end{cases} \quad (4)$$

$$u_{ncr} \approx 0,35(T_0 + 955). \quad (5)$$

Данное представление явно указывает диапазон температур, внутри которого аппроксимации могут быть использованы (в силу физической невозможности отрицательного значения коэффициентов). Область напыления соответствует условию $DE \geq 0$. Используя найденные аппроксимации, попытаемся качественно определить ее границы. В этом случае одновременно должны выполняться два неравенства:

$$T_0 > 180 \text{ °С,} \\ T_0 > \left(\frac{u_n}{0,35} - 955 \right) \text{ °С.}$$

Рис. 6. Зависимость коэффициента напыления от скорости перемещения сопла и линейная аппроксимация экспериментальных данных.

Температура торможения: 400 (1), 600 (2) °С.

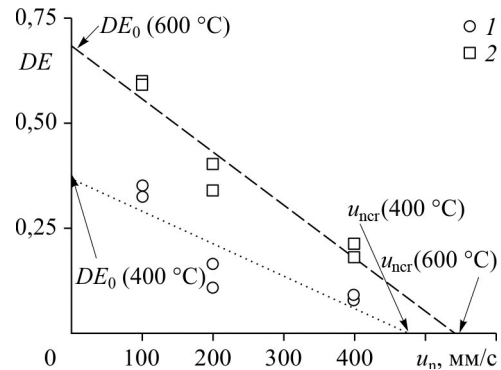


Таблица 2
Значения коэффициента напыления

u_n , мм/с	T_0 , °C	
	400	600
100	0,330	0,601
	0,352	0,595
200	0,167	0,341
	0,109	0,404
400	0,077	0,213
	0,09	0,187

Таблица 3
Значения коэффициентов линейной аппроксимации (3)

Коэффициенты линейной аппроксимации	T_0 , °C	
	400	600
DE_0	0,368	0,684
u_{ncr} , мм/с	475	545

Графически область существования напыления может быть представлена следующим образом (рис. 7). При скорости перемещения сопла меньше некоторой величины (в данном примере менее ~ 400 мм/с) напыление происходит, когда температура торможения ускоряющего частицы воздуха превышает некоторое критическое значение (здесь $T_{0cr} \approx 180$ °C). При более высоких скоростях перемещения сопла требуется более высокая температура торможения, причем, чем выше скорость перемещения сопла, тем выше должна быть температура напыления.

Далее, чтобы получить зависимость коэффициента напыления от скорости перемещения сопла и температуры торможения воздуха, подставим аппроксимации (4) и (5) в ранее приведенную формулу (3), в результате получим

$$DE(u_n, T_0) = 1,63 \cdot 10^{-3} (T_0 - 180) \left(1 - \frac{u_n}{0,35(T_0 + 955)} \right). \quad (6)$$

Результаты расчета по формуле (6) и сравнение с полученными экспериментальными данными представлены на рис. 8. Видно, что экспериментальные данные достаточно хорошо описываются формулой (6). Однако при скорости перемещения сопла 200 мм/с она дает завышенные значения в области температур 400 и 600 °C.

В целом проведенные исследования наглядно демонстрируют, что результаты измерения коэффициента напыления зависят от того, какая была выбрана скорость перемещения сопла. При этом, чем выше эта скорость, тем ниже измеренное значение коэффициента напыления. Авторы предполагают, что причиной этого является влияние времени индукции, которое приводит к существованию некоторой критической скорости перемещения сопла, при которой масса израсходованного порошка на единицу площади поверхности подложки оказывается сравнимой с массой порошка, необходимого для

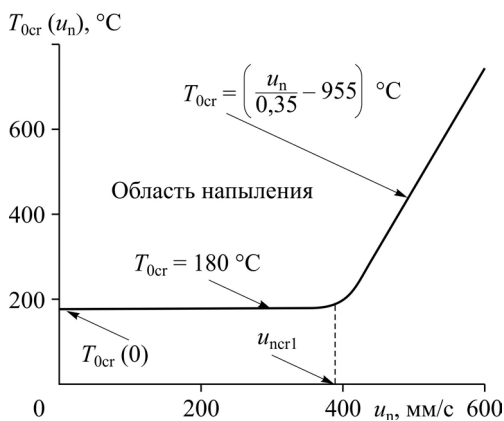


Рис. 7. Область существования напыления (качественное представление, полученное с использованием найденных аппроксимаций).

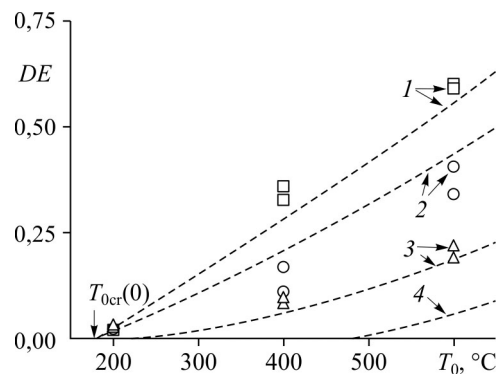
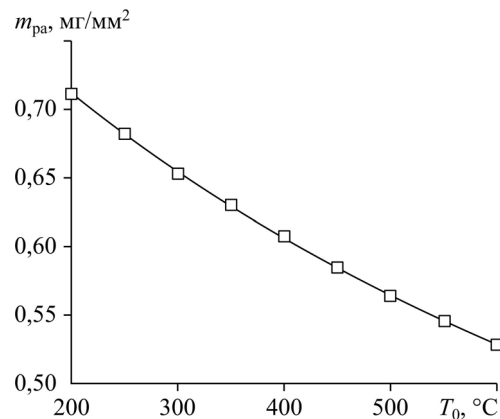


Рис. 8. Зависимость коэффициента напыления от температуры торможения газа. Экспериментальные значения (символы) и расчет (линии) по формуле (6): $u_n = 100$ (1), 200 (2), 400 (3), 500 (4) мм/с.

Рис. 9. Зависимость удельной массы порошка, необходимого для активации поверхности подложки, от температуры торможения ускоряющего частицы воздуха.



активации поверхности подложки до того момента, как покрытие начнет расти. Это позволяет представить коэффициент напыления в виде произведения двух множителей, один из которых зависит от скорости перемещения сопла, а другой не зависит от неё. Таким образом, множитель, не зависящий от скорости перемещения сопла, можно назвать «истинным» коэффициентом напыления. Полученные в работе аппроксимации показывают, что множитель DE_0 является «истинным» коэффициентом напыления. Также в работе впервые получено, что критическая скорость перемещения сопла (которая обратно пропорциональна массе порошка, необходимого на предварительную подготовку поверхности подложки) увеличивается с ростом температуры торможения ускоряющего частицы газа. Зависимость удельной массы порошка, необходимого для активации поверхности подложки \bar{m}_{pa} , от температуры торможения ускоряющего частицы воздуха представлена на рис. 9.

Она рассчитана по формуле (7), полученной из (1), с учетом, что $\bar{m}_p = \frac{m_p}{L_c w_c}$:

$$\bar{m}_{pa} = \frac{G_p}{w_c u_{ncr}(T_0)}, \quad (7)$$

здесь $w_c = 8$ мм — ширина дорожки покрытия. Видно, что активационная масса порошка, а следовательно, и время индукции уменьшаются с ростом температуры торможения воздуха. Надо отметить, что это находится в соответствии с ранее обнаруженной зависимостью времени индукции от скорости частиц при ускорении последних смесью воздуха с гелием. С ростом скорости частиц время индукции уменьшается, соответственно критическая скорость перемещения сопла возрастает. Поскольку с ростом температуры торможения ускоряющего газа увеличивается не только скорость частиц, но и их температура и температура поверхности подложки, то установленное в настоящей работе уменьшение активационной массы по сути является совокупным эффектом. Для выяснения степени влияния каждого из перечисленных параметров требуется проводить дополнительные исследования.

Заключение

На примере холодного газодинамического напыления порошка меди с помощью подогретого до 400 – 600 °C воздуха впервые экспериментально показано, что критическая скорость перемещения сопла, обратно пропорциональная массе порошка, необходимого для предварительной активации поверхности подложки, зависит от температуры торможения ускоряющего газа. С ростом температуры торможения масса порошка, необходимая для активации поверхности подложки, уменьшается, что приводит к увеличению критической скорости перемещения сопла.

Список литературы

1. Papyrin A., Kosarev V., Klinkov S., Alkhimov A., Fomin V. Cold spray technology. Amsterdam: Elsevier Sci., 2007. 336 p.
2. Kosarev V.F., Klinkov S.V., Papyrin A.N. Supersonic jet/substrate interaction in the cold spray process // The cold spray materials deposition process. Fundamentals and applications / Ed. V.K. Champagne. England, Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2007. P. 178–216.

3. Maev R., Leshchynsky V. Introduction to low pressure gas dynamic spray // Physics & Technology. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. 234 p.
4. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. Метод «холодного» газодинамического напыления // ДАН СССР. 1990. Т. 315, № 5. С. 1062–1065.
5. Papyrin A.N., Kosarev V.F., Klinkov S.V. Effect of the substrate surface activation on the process of cold spray coating formation // Thermal Spray 2005: Thermal Spray Connects: Explore its Surfacing Potential! / Ed. by E. Lugscheider. May 2–4, 2005 (Basel, Switzerland). Germany, Dusseldorf: DVS-German Welding Society, 2005. P. 145–150.
6. Klinkov S.V., Kosarev V.F. Measurements of cold spray deposition efficiency // J. Therm. Spray Technol. 2006. Vol. 15. P. 364–371.
7. Shikalov V.S., Klinkov S.V., Kosarev V.F. Cold spray on materials with low erosion resistance // AIP Conf. Proc. 2016. Vol. 1770. P. 040015-1–040015-8.
8. Шикалов В.С., Клинков С.В., Косарев В.Ф. Холодное газодинамическое напыление алюминиевого покрытия на эрозионно нестойкий материал // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 5. С. 779–787.
9. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф. Исследование взаимодействия двухфазного потока с нагретой поверхностью // Теплофизика и аэромеханика. 1998. Т. 5, № 1. С. 67–73.
10. Rech S., Trentin A., Vezzu S., Legoux J.G., Irissou E., Guagliano M. Influence of pre-heated Al 6061 substrate temperature on the residual stresses of multipass al coatings deposited by cold spray // J. Therm. Spray Technol. 2011. Vol. 20, No. 1. P. 243–251.
11. Suo X.K., Yu M., Li W.Y., Planche M.P., Liao H.L. Effect of substrate preheating on bonding strength of cold-sprayed Mg coatings // J. Therm. Spray Technol. 2012. Vol. 21, No. 5. P. 1091–1098.
12. Yin Sh., Suo X., Guo Zh., Liao H., Wang X. Deposition features of cold sprayed copper particles on preheated substrate // Surf. Coat. Technol. 2015. No. 268. P. 252–256.
13. Ernst K.-R., Braeutigam J., Gaertner F., Klassen T. Effect of substrate temperature on cold-gas-sprayed coatings on ceramic substrates // J. Therm. Spray Technol. 2013. Vol. 22, No. 2–3. P. 422–432.
14. Watanabe Y., Yoshida Ch., Atsumi K., Yamada M., Fukumoto M. Influence of substrate temperature on adhesion strength of cold-sprayed coatings // J. Therm. Spray Technol. 2015. Vol. 24, No. 1–2. P. 86–91.
15. Legoux J.G., Irissou E., Moreau C. Effect of substrate temperature on the formation mechanism of cold-sprayed aluminum, zinc and tin coatings // J. Therm. Spray Technol. 2007. Vol. 16, No. 5–6. P. 619–626.
16. Li W., Yin S., Guo X., Liao H., Wang X., Coddet C. An investigation on temperature distribution within the substrate and nozzle wall in cold spraying by numerical and experimental methods // J. Therm. Spray Technol. 2012. Vol. 21, No. 1. P. 41–48.
17. Yin Sh., Wang X., Li W., Li Y. Numerical study on the effect of substrate size on the supersonic jet flow and temperature distribution within the substrate in cold spraying // J. Therm. Spray Technol. 2012. Vol. 21, No. 3–4. P. 628–635.
18. Ryabinin A.N., Irissou E., McDonald A., Legoux J.-G. Simulation of gas-substrate heat exchange during cold-gas dynamic spraying // Int. J. Therm. Sci. 2012. No. 56. P. 12–18.
19. McDonald A.G., Ryabinin A.N., Irissou E., Legoux J.-G. Gas-substrate heat exchange during cold-gas dynamic spraying // J. Therm. Spray Technol. 2013. Vol. 22, No. 2–3. P. 391–397.
20. Chen Ch., Xie Y., Verdy Ch., Huang R., Liao H., Ren Zh., Deng S. Numerical investigation of transient coating build-up and heat transfer in cold spray // Surf. Coat. Technol. 2017. No. 326. P. 355–365.
21. Zhao Z.B., Gillispie B.A., Smith J.R. Coating deposition by the kinetic spray process // Surf. Coat. Technol. 2006. No. 200. P. 4746–4754.
22. Varadaraajan V., Mohanty P. Design and optimization of rectangular cold spray nozzle: radial injection angle, expansion ratio and traverse speed // Surf. Coat. Technol. 2017. No. 316. P. 246–254.
23. Chen Ch., Xie Y., Verdy Ch., Huang R., Liao H., Ren Zh., Deng S. Numerical investigation of transient coating build-up and heat transfer in cold spray // Surf. Coat. Technol. 2017. No. 326. P. 355–365.
24. Kotoban D., Grigoriev S., Okunkova A., Sovva A. Influence of a shape of single track on deposition efficiency of 316L stainless steel powder in cold spray // Surf. Coat. Technol. 2017. No. 309. P. 951–958.
25. Gilmore D.L., Dykhuizen R.C., Neiser R.A., Smith M.F., Roemer T.J. Particle velocity and deposition efficiency in the cold spray process // J. Therm. Spray T.J. Technol. 1999. No. 8. P. 576–582.
26. Meyer M.C., Yin S., McDonnell K.A., Stier O., Lupoi R. Feed rate effect on particulate acceleration in cold spray under low stagnation pressure conditions // Surf. Coat. Technol. 2016. No. 304. P. 237–245.
27. Ozdemir O.C., Wildener C.A., Carter M.J., Johnson K.W. Predicting the effect of powder feeding rate on particle impact conditions and cold spray deposited coatings // J. Therm. Spray Technol. 2017. No. 26. P. 1598–1615.
28. Klinkov S.V., Kosarev V.F., Shikalov V.S. Influence of nozzle velocity and powder feed rate on the coating mass and deposition efficiency in cold spraying // Surf. Coat. Technol. 2019. No. 367. P. 231–243.

*Статья поступила в редакцию 12 мая 2020 г.,
после доработки — 17 августа 2020 г.,
принята к публикации 7 октября 2020 г.*