

В. Е. АРХИПОВ, А. Ф. ЛОНДАРСКИЙ, кандидаты технических наук, А. Ф. МЕЛЬШАНОВ, Г. В. МОСКВИТИН, д-р техн. наук, М. С. ПУГАЧЁВ, Н. С. ФАЛАЛЕЕВ (ИМАШ им. А. А. Благонравова РАН), e-mail: vearkhipov@mail.ru

Технологические особенности газодинамического напыления покрытий¹

Исследовано влияние гранулометрического состава и физико-механических характеристик порошковых материалов на процесс нанесения покрытий газодинамическим напылением. Приведена физико-математическая модель, позволяющая определить тип газового потока и максимальную температуру нагревания наносимых частиц.

Ключевые слова: газодинамическое напыление, частицы корунда, твердость, покрытие, медь, никель.

The influence of granulometric composition and physical and mechanical characteristics of powder materials on coating application process by gas-dynamic spraying is investigated. The physical-mathematical model, allowing obtaining the type of a gas flow and maximum heating temperature of the applied particles, is given.

Keywords: gas-dynamic spraying, corundum particles, hardness, coating, cuprum, nickel.

Метод газодинамического напыления (ГДН) используется: для устранения механических повреждений деталей, появляющихся как в процессе производства, так и при их эксплуатации; восстановления посадочных мест подшипников, когда металл наносят непосредственно на изношенную поверхность; устранения течи рабочих газов и жидкостей при невозможности использования стандартных герметиков, в частности при ремонте сосудов, работающих под давлением или при низких и высоких температурах (элементы криогенных систем, систем охлаждения, трубопроводов, теплообменников и т. п.); защиты поверхности от коррозии путем нанесения цинка, никеля, алюминия [1, 2].

Газодинамическое напыление различают по используемому газу и температуре его нагрева, месту введения напыляемого порошка в поток (до сопла или после) и т. д. Наиболее часто используемой характеристикой метода ГДН является давление газа. Гелий или азот подают под давлением до 1,5 МПа и выше при температуре до 1000 °С. Так как скорость истечения газа в несколько раз больше скорости звука, то вводимые в поток частицы порошка, например титана, приобретают достаточную энергию для формирования качественного покрытия. Воздух подают под давлением до 0,6 МПа при

температуре до 600 °С. В этом случае энергии потока частиц недостаточно для формирования покрытия с высокими механическими характеристиками (адгезия, когезия). С целью повышения эксплуатационных свойств покрытия для напыления используют смеси пластичных (Ni, Cu, Al, Zn) и твердых частиц (Al_2O_3Z). Твердые частицы, соударяясь с пластичными, деформируют их и уплотняют покрытие [2].

Покрытия, наносимые ГДН, имеют высокие механические характеристики: адгезия — прочность сцепления с подложкой, не менее 40 МПа в зависимости от твердости и состояния поверхности стали, когезия — 60 МПа и более [3]. Нанесение никеля и цинка на низкоуглеродистую сталь снижает скорость распространения коррозии в среде слабого электролита соответственно до 20 и 43 раз [4]. Формирование покрытия зависит от технологических параметров напыления и свойств используемых металлов, поэтому их оценка и оптимизация позволят повысить механические характеристики и контролировать свойства нанесенного металла.

Металлы на образцы из стали 20 напыляли на газодинамической установке ДИМЕТ-404. Порошок для напыления покрытия состоял из смеси частиц меди или никеля с корундом в соотношении 1:1 [2].

Влияние гранулометрического состава и физико-механических свойств наносимых материалов на процесс напыления оценивали измерением давления потока газа на поверхность динамометра (рис. 1), который предварительно тарировали с ис-

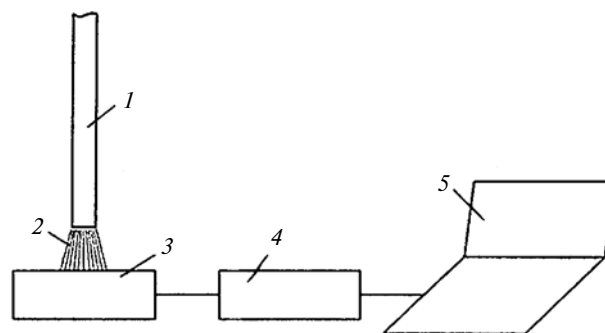


Рис. 1. Схема измерения давления потока частиц:

1 — разгонная часть сопла; 2 — струя газа с твердыми и пластичными частицами; 3 — динамометр; 4 — система L-card сбора данных; 5 — ПК с программой ACTest 1.16 для обработки данных

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-08-00634А.

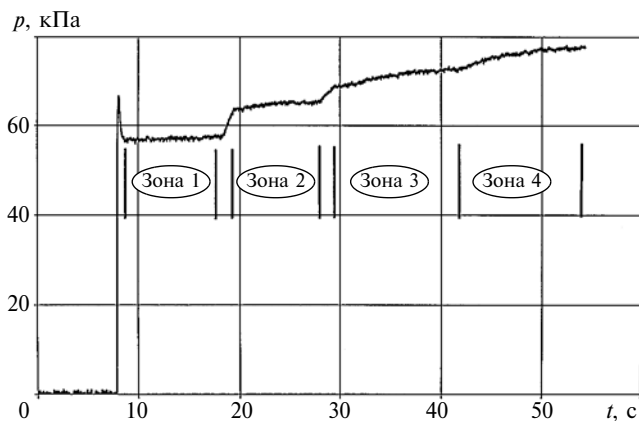


Рис. 2. Зависимость давления p потока воздуха от времени t нагрева при температуре $T = 20$ (зона 1), 180 (зона 2), 360 (зона 3) и 540 °C (зона 4)

пользованием стандартной массы и устанавливали на расстоянии 10 мм от сопла распылителя. Поток воздуха нормальной температуры направляли на динамометр и после достижения постоянного давления нагревали до 180 °C. Изменения температуры регистрировали в цифровом и графическом виде. Затем температуру воздуха последовательно повышали до 360 и 540 °C с выдержкой ≈ 10 с при каждой температуре. Зависимость давления p потока воздуха от температуры T нагрева приведена на рис. 2.

В поток воздуха, нагретого до 180 , 360 и 540 °C, вводили смесь частиц металла и оксида, давление регистрировали в цифровом и графическом виде. Зависимости давления порошков строили по средним значениям, полученным при температурах 180 , 360 и 540 °C в течение 10 с (рис. 3 и 4).

Твердость нанесенного слоя металла измеряли методом Виккерса при нагрузке 245,2 мН на микротвердомере HNV-2 (SHIMADZU) [5]. Размер частиц порошковой смеси исследовали на стереомикроскопе SMZ 1500 NIKON. Микрорельеф поверхности образцов из стали после обработки корундом исследовали на профилографе TIME TR 200 по стандарту ISO 4287. Перед напылением все образцы обрабатывали оксидом алюминия (корундом), а профиль поверхности измеряли на профилографе.

Для оценки влияния свойств, качества поверхности и технологических параметров наносимых порошков меди и никеля на их сцепление с подложкой использовали контрольные образцы из стали ШХ15 твердостью 6420 МПа размерами $30 \times 20 \times 3$ мм и массой 22,5 г. На поверхность образцов наносили покрытия меди и никеля в течение 10 с при температурах 180 , 360 и 540 °C и разным расходе порошковой смеси. Для уменьшения влияния нагрева подложки на процесс покрытия

напыляли, перемещая сопло относительно поверхности со скоростью 0,01 м/с на 30 мм в одну сторону, а затем в другую.

На контрольные образцы таких же размеров из стали 40Х твердостью 2380 МПа, алюминия твердостью 364 МПа и его сплавов твердостью 672 и 1570 МПа наносили покрытие никеля при температуре 540 °C и расходе порошковой смеси 0,29 г/с. Массу наносимого покрытия определяли на электронных весах с точностью 0,01 г.

Чтобы оценить максимальную температуру частицы, разработали физико-математическую модель, в которой частицу металла рассматривали в форме параллелепипеда размером $20 \times 30 \times 40$ мкм. Время нагрева частицы воздухом рассчитывали исходя из расстояния, которое она пролетает до подложки (130 мм), и ее скорости 180 м/с [6].

Температура газа за аэродинамическим соплом значительно снижается в результате адиабатического расширения [1, 2]. При решении данной за-

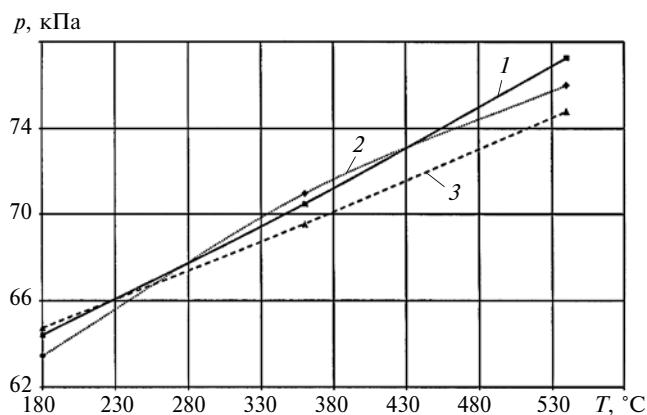


Рис. 3. Изменение давления p смеси частиц меди и корунда в зависимости от температуры T при расходе 0,18 (1), 0,4 (2) и 0,56 г/с (3)

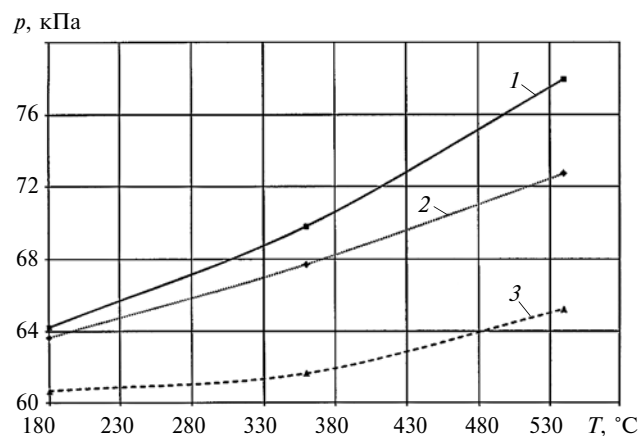


Рис. 4. Изменение давления p смеси никеля и корунда в зависимости от температуры T при расходе 0,08 (1), 0,19 (2) и 0,29 г/с (3)

дачи было принято допущение, что поток газа имеет температуру 600 °С, которая не меняется вплоть до соприкосновения с подложкой. Явлениями, связанными с изменением скорости частицы относительно скорости потока воздуха, пренебрегли, так как скорость частицы за время ее движения остается значительно ниже скорости потока, а коэффициент теплоотдачи, вязкость воздуха и другие параметры изменяются незначительно. Не учитывали также взаимодействие частиц со стенками разгонного сопла и возникающие при этом эффекты. При расчетах физические константы, связанные со свойствами материалов, определяли по справочным данным [7].

Давление воздуха изменялось с 65 до 77 кПа при повышении температуры со 180 до 540 °С, что обусловлено повышением скорости и энергии молекул газа. Введение смеси частиц меди и корунда с расходом 0,18 г/с не влияет на давление воздуха во всем диапазоне температур напыления (см. рис. 3). Энергия молекул газа при соударении с металлическими и неметаллическими частицами затрачивается на их ускорение: чем больше частиц и больше их размеры и/или масса, тем больше снижается энергия потока при одинаковой температуре нагрева. Можно предположить, что отсутствие снижения давления обусловлено незначительным количеством частиц в потоке воздуха. Существенное увеличение расхода порошка (с 0,4 до 0,56 г/с) сопровождается незначительным снижением давления.

При визуальном осмотре поверхности после напыления наличие меди наблюдалось на всех контрольных образцах. Однако при минимальном расходе смеси частиц меди и корунда (0,18 г/с) наличие нанесенного металла массой 0,01 г установлено только при напылении с температурой 540 °С (табл. 1). При расходе порошковой смеси 0,4 г/с и тех же времени и температуре напыления получают покрытие массой 0,39 г. При незначительном расходе порошковой смеси удельное давление на поверхность выше, чем при большом расходе (см. рис. 3). В этом случае увеличение массы покрытия на подложке должно быть больше, однако этого не наблюдается при напылении меди. Следовательно, на нанесение и увеличение массы покрытия (производительность) влияют не только энергетические параметры процесса, но и количество металла в потоке воздуха.

Использование смеси никеля и корунда дает другой результат, хотя расход порошка значительно ниже, чем при использовании смеси меди и корунда. Введение в поток газа небольшого количества смеси (0,08 г/с) не влияет на давление. В данном случае, как и при напылении меди, количество частиц порошковой смеси настолько мало, что их вве-

дение в поток не оказывает существенного влияния на кинетическую энергию молекул газа. Увеличение расхода смеси корунда и никеля до 0,19 г/с и более сопровождается значительным падением давления потока воздуха с частицами (см. рис. 4).

На контрольных образцах отмечено наличие никеля массой 0,01 г только при напылении с температурой воздуха 540 °С и расходе порошковой смеси 0,29 г/с. Напыление никеля значительно менее производительный процесс, чем напыление меди. Полученные результаты можно объяснить, с одной стороны, снижением энергетических параметров процесса напыления (снижением давления), что обусловлено размерами и формой частиц, с другой стороны, влиянием, например, твердости и нагрева (табл. 2) частиц при присоединении их к подложке.

Исследование порошковых смесей меди и никеля показало, что частицы никеля в 1,5 раза больше частиц меди, средний размер которых составлял 30 мкм (рис. 5, а, б, см. обложку). Плотности меди и никеля практически одинаковы, масса частиц никеля значительно превышает массу частиц меди, что, по-видимому, влияет на снижение энергетических параметров процесса напыления (см. рис. 4). Рассматривая теоретические аспекты ГДН покрытий, отметим, что при недостатке энергии частицы не могут закрепиться на поверхности, при избытке — отражаются от нее. Можно предположить, что слой никеля формируется в основном за счет частиц с меньшими размерами и массой, а следовательно, при достаточной для нанесения покрытия кинетической энергии.

Расчеты показали, что при действии нагретого воздуха частицы металла нагреваются мало, и их механические свойства не изменяются. Так как число Био (Bi) мало, то передача теплоты от нагретого потока воздуха к частице и дальнейшее ее распространение в объеме является лимитирую-

Таблица 1

Масса нанесенной меди

Напыляемый металл	Расход порошка, г/с	Температура, °С	Масса меди, г
Медь	0,18/0,40	180	0/0,01
		360	0/0,15
		540	0,01/0,39

Таблица 2

Температура, °С, нагрева частиц потоком воздуха

Напыляемый металл	Элемент частицы (параллелепипеда)			
	грань	ребро	угол	в центре
Медь	70,18	116,02	157,90	70,16
Никель	63,95	104,58	142,12	63,88

щим моментом [8]. Этот вывод был подтвержден численным моделированием процесса теплопроводности:

$$Bi = \alpha l / \lambda \approx \alpha \cdot 10^{-7} \leq 10^{-4} \ll 1,$$

где $\alpha = 1 \div 1000$ Вт/(м²·К) — коэффициент теплоотдачи [7] (более точная оценка дана ниже); $l \approx 10^{-5}$ м — характерный размер; $\lambda = 375$ Вт/(м·К) — коэффициент теплопроводности меди.

Для решения уравнения теплопроводности необходимо поставить граничные условия III рода, при которых теплообмен на границе соответствует закону Ньютона—Рихмана [8]. Тогда для частицы получим:

$$\partial T_c / \partial t = k(T_b - T_c). \quad (1)$$

Здесь T_b — температура воздуха у поверхности частицы, °С; T_c — температура поверхности частицы, °С; $k = \alpha S / C$, где S — площадь поверхности частицы, м²; $C = C_p m$ — теплоемкость частицы; C_p — удельная теплоемкость частицы [для меди $C_p = 380$ Дж/(кг·К)]; m — масса частицы, кг.

Решение дифференциального уравнения (1) дает зависимость температуры поверхности частицы от времени, которая используется при решении уравнения теплопроводности в качестве граничных условий:

$$T_c = T_b + e^{-kt}(T_0 - T_b), \quad (2)$$

где T_0 — начальная температура частицы, °С.

Для расчета по формуле (2) необходимо определить коэффициент α теплоотдачи на основании теории подобия [8]:

$$Nu = f(Re, Pr, \dots) = \alpha l / \lambda_b, \quad (3)$$

где Nu , Re и Pr — числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля ($Pr \approx 0,7$ в условиях эксперимента [9]); $\lambda_b = 0,06$ Вт/(м·К) — теплопроводность воздуха при 600 °С.

Число Рейнольдса определим по формуле $Re = \rho v l / \eta$, где $\rho = 1,25$ кг/м³ — плотность воздуха; $v = 600$ м/с — скорость воздушного потока; $\eta = 3,9 \cdot 10^{-5}$ Па·с — динамическая вязкость воздуха в условиях эксперимента.

Исходя из значения числа Рейнольдса, можно сделать вывод о ламинарном характере потока, обтекающего частицы. Тогда число Нуссельта определим по формуле

$$Nu = 0,33 Re^{1/2} Pr^{1/3} \approx 4,14. \quad (4)$$

Подставив найденное по формуле (4) значение в выражение (3), получим искомый коэффициент

теплоотдачи. Тогда уравнение теплопроводности с граничными условиями запишем в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right); \\ T_c(t) = T_{bh} + e^{-\frac{\alpha S t}{C}} (T_0 - T_{bh}), \end{cases} \quad (5)$$

где $\rho = 8890$ кг/м³ — плотность меди; $T_0 = 20$ °С; $T_{bh} = 600$ °С; $t \in [0; 0,001]$; $x \in [0; l_x]$; $y \in [0; l_y]$; $z \in [0; l_z]$.

Для численного решения уравнений (5) построена разностная схема [10], после подстановки параметров в которую проверены соответствующие критерии устойчивости и корректности и написана программа для ЭВМ. Результаты расчета приведены в табл. 3. Так как частица металла не имеет острых граней и углов (см. рис. 5), то ее нагрев не превышает 70 °С.

Метод ГЦН основан на ударе частицы с высокой кинетической энергией о мишень (подложку). При соударении реализуются следующие механизмы закрепления частицы на поверхности. Первый механизм, в котором, по-видимому, основной является пластическая деформация частицы, в результате которой заполняются дефекты, наносимые подложке металлом. Частицы закрепляются на подложке за счет сцепления с микронеровностями (механическая связь). Второй механизм — локальная деформация подложки при ударе частицы с формированием лунки и закреплением в ней металла. Для других частиц такая деформация поверхности может быть дополнительным закреплением наносимого металла на подложке (механическая связь). Третий механизм — возможность образования локальной (точечной) ванны расплава при выделении энергии от соударения тел (металлическая связь). На границе раздела "подложка—наносимый металл" следует учитывать также диффузию, т. е. обмен атомами при соударении тел.

Испытание покрытия меди на адгезию показало, что прочность сцепления существенно зависит от шероховатости поверхности [3]. При увеличе-

Таблица 3
Результаты измерения шероховатости поверхности и массы никеля

Твердость металла, МПа	Параметры шероховатости поверхности, мкм				Масса напыленного металла, г
	<i>Ra</i>	<i>Rz</i>	<i>Rt</i>	<i>Sm</i>	
6420	3,600	14,65	27,81	0,0975	0,01
2380	3,686	14,82	30,50	0,1081	0,22
1570	6,941	15,89	38,65	0,2105	0,08
672	7,690	21,32	48,59	0,1818	0,16
364	8,273	18,84	53,18	0,2352	0,08

нии параметра Ra шероховатости поверхности с 0,32 до 2,5 мкм прочность сцепления повышается в 1,5÷2 раза. Кроме того, на поверхности подложки после смещения (отрыва) меди по краю нанесенного слоя наблюдаются более плотные участки частиц металла, чем в середине. Так как на периферии потока частиц их температура и скорость не могут быть выше, чем в центре, то, безусловно, установленное отличие плотностей частиц можно объяснить только их сцеплением с микронеровностями при условии оптимального расположения относительно направления потока. Это также свидетельствует о сцеплении частиц с микронеровностями поверхности подложки (механическая связь).

Возможность деформирования поверхности подложки (образца) частицами с формированием лунки зависит от механических характеристик наносимого металла и подложки, например твердости. Если твердость металла меньше твердости подложки, то сцепление можно исключить. Если твердость частиц значительно больше твердости подложки, то весьма возможно их внедрение в подложку. Уменьшение твердости стали с 6420 до 1570 МПа позволяет весьма существенно увеличить нанесенную массу никеля при тех же параметрах напыления — с 0,01 до 0,22 г (см. табл. 3). Если рассматривать шероховатость поверхности сталей после обработки корундом как фактор, влияющий на соединение частиц никеля с основой, то можно отметить, что параметры Ra и Rz отличаются незначительно, т. е. шероховатость поверхности не является основной причиной повышения производительности. В этом случае можно предположить, что увеличение массы покрытия никеля при одинаковых параметрах процесса напыления может происходить за счет внедрения частиц в подложку.

Измерение массы никеля, нанесенного на подложку из алюминия и его сплавов разной твердости, позволило установить еще более существенный фактор: масса никеля, нанесенного на подложку твердостью 672 МПа, составляет 0,16 г, что в 2 раза больше, чем при твердости подложки 364 и 1570 МПа (см. табл. 3). Параметры Ra , Rz , Rt шероховатости поверхности увеличиваются при уменьшении твердости мишени, и если бы только шероховатость поверхности влияла на сцепление частиц с подложкой, то масса никеля должна была бы повышаться. Если же соотнести результаты измерения массы никеля со средним шагом Sm неровностей профиля, то можно заметить их корреляцию (см. табл. 3), так как от длины шага неровностей зависит возможность закрепления частиц металла на поверхности. Можно предположить, что при $Sm = 0,1\div 0,2$ мкм, частица может попасть между выступами и надежно закрепиться. При $Sm < 0,1$ мкм частицы не могут попасть между вы-

ступами, и число частиц, закрепившихся на поверхности мишени, уменьшается, как при напылении никеля на сталь твердостью 6420 и 2380 МПа (см. табл. 3). При $Sm > 0,2$ мкм частицы, попадая между выступами, не могут надежно закрепиться, поэтому при одинаковых параметрах процесса наблюдается уменьшение массы напыляемого металла, что и происходит при напылении никеля на алюминий и его сплавы. Очевидно, что параметр Sm влияет на закрепление частиц на поверхности только при определенных соотношениях величин выступов и впадин, а также размеров и форм частиц.

Рассмотрим напыление покрытия как соударение двух тел. В теории соударения существуют две модели: абсолютно упругого и абсолютно неупругого удара [11]. При ГДН твердые частицы отражаются от поверхности и могут влиять на частицы падающего потока, изменяя, например, их скорость и траекторию. Частицы пластичных металлов в зависимости от условий напыления могут отражаться от поверхности или соединяться с ней. Для присоединяющихся частиц можно использовать модель абсолютно неупругого удара, когда механическая энергия частично или полностью переходит во внутреннюю энергию тела (нагревание).

Поэтому задачу сформулируем следующим образом. Частица металла массой m_1 , летящая со скоростью $\vec{v}_1$, попадает в мишень массой m_2 , которая имеет скорость $\vec{v}_2$, и присоединяется к ней. В общем случае мишень вместе с частицей может приобрести скорость $\vec{u}$. Тогда по закону сохранения импульса [11]:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{u}. \quad (6)$$

Выражение (6) можно преобразовать и представить в скалярном виде:

$$u = \frac{m_1 v_1 \pm m_2 v_2}{m_1 + m_2}. \quad (7)$$

Количество механической энергии, перешедшей во внутреннюю энергию (теплоту), равно разности энергий до и после удара

$$Q = (w_1 + w_2) - W = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} - \frac{(m_1 + m_2)}{2} u^2, \quad (8)$$

где Q — количество выделившейся теплоты, Дж; w_1 — энергия частицы, Дж; w_2 — энергия мишени, Дж; W — энергия после соударения, Дж.

Учитывая, что $v_2 = 0$, а при большой массе мишени ($m_2 \gg m_1$) скорость системы после соударения также равна нулю [$u = 0$, см формулу (7)], из формулы (8) получим:

$$Q = m_1 v_1^2 / 2, \quad (9)$$

т. е. почти вся кинетическая энергия частицы переходит во внутреннюю энергию (нагрев).

При газодинамическом напылении масса частиц значительно меньше массы подложки, и в этом случае для расчета выделяемой энергии можно использовать формулу (9).

Расчет для частицы меди диаметром 30 мкм, летящей со скоростью 180 м/с, показал, что выделяемая при столкновении с подложкой энергия составляет $\approx 0,23$ нДж.

Для формирования общей с частицей металлургической ванны поверхность подложки необходимо привести в жидкое состояние. Для получения расплава за короткое время необходимо, чтобы температура частицы меди превысила на несколько сотен градусов температуру плавления стали. Количество теплоты (энергии), необходимое для расплавления частицы меди и достижения нужной температуры, можно рассчитать по формуле [8, 9]

$$Q = Cm(t_2 - t_1),$$

где t_1 и t_2 — начальная и конечная температура, град.

Расчеты показали, что для данного случая энергия должна быть не менее 80 нДж, что на два порядка больше полученного результата. На основании упрощенной схемы расчета можно сделать вывод о малой вероятности события, при котором реализуется механизм закрепления частицы металла на подложке за счет формирования металлической связи. Используя выражение (9), можно рассчитать, что для получения температуры, необходимой для формирования общей металлургической ванны, скорость частицы должна быть не менее 900 м/с.

Механизмы диффузии различны и зависят от типа кристаллической решетки, вида химических связей, природы диффундирующих атомов и, главным образом, от наличия дефектов кристаллической структуры. При ГДН на подложку действуют частицы пластичного металла и твердые частицы корунда. Удары частиц корунда приводят к пластической деформации металлов, при которой число точечных и протяженных дефектов структуры, таких как вакансии и дислокации, значительно возрастает [6]. С учетом экспоненциальной зависимости коэффициента диффузии от температуры при ГДН покрытий может реализовываться диффузия атомов по вакансионному механизму.

Закрепление частиц на подложке обусловлено в основном механизмом механического сцепления наносимого металла с микронеровностями поверхности. В этом случае напыление более пластичного металла позволяет наносить покрытие с большей производительностью при прочих равных техно-

логических параметрах. Например, относительное удлинение никеля $\delta = 35 \div 40$ %, а меди — 60 %, что отражается на процессе газодинамического нанесения покрытий.

Таким образом, установлено:

увеличение размера частиц до $40 \div 50$ мкм при одинаковой плотности наносимых металлов приводит к значительному снижению давления (энергии) потока частиц на поверхность;

основным механизмом закрепления частицы на поверхности при газодинамическом напылении является механическое сцепление с микронеровностями поверхности. При этом на возможность сцепления частицы с подложкой влияют не только величины выступов и впадин, но и расстояние между ними;

формирование металлической связи с подложкой за счет выделения энергии при соударении частицы с поверхностью мишени маловероятно, так как для этого скорость частицы должна достигать 900 м/с;

нагрев частиц под воздействием температуры воздуха незначителен (≈ 70 °С) и не может оказывать влияние на механические характеристики металлов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Холодное** газодинамическое напыление / А. П. Алхимов, С. В. Клинов, В. Ф. Косарев, В. М. Фомин // Теория и практика. М.: Физматлит, 2010. 536 с.
2. **Димет**. Применение технологии и оборудования. <http://www.dimet-r.narod.ru>
3. **Повышение** качества газодинамических покрытий / В. Е. Архипов, А. В. Балашова, А. Ф. Лондарский и др. // Технология машиностроения. 2012. № 8. С. 48—51.
4. **Коррозионные** свойства покрытий, нанесенных газодинамическим напылением / В. Е. Архипов, А. А. Дубравина, А. Ф. Лондарский и др. // Коррозия: материалы и защита. 2012. № 4. С. 33—38.
5. **ГОСТ 2999—75**. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. М.: Изд-во стандартов, 1987. 30 с.
6. **Обработка** стали твердыми частицами с использованием газодинамических установок / В. Е. Архипов, А. Ф. Лондарский, А. Ф. Мельшанов и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 9. С. 7—12.
7. **Зиновьев В. Е.** Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия, 1989. 384 с.
8. **Баскаков А. П.** Теплотехника. М.: Энергия, 1982. 264 с.
9. **Михеев М. А., Михеева И. М.** Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.
10. **Самарский А. А.** Введение в численные методы: Учеб. пос. для вузов. СПб.: Лань, 2005. 288 с.
11. **Калашников Н. П., Тихонов В. К.** Физика. Основы механики. М.: Наука, 1999. 379 с.