

## ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАПЫЛЕНИЯ

А. П. Алхимов, В. Ф. Косарев, А. Н. Папырин

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Представлены результаты экспериментального исследования особенностей формирования покрытий газодинамическим методом из металлических порошков ( $d_{\text{ч}} < 50$  мкм) на подложках из различных материалов в зависимости от скорости частиц (200–1200 м/с), температуры струи (300–700 К) и других параметров. Изложены результаты поисковых исследований, связанные с реализацией способов ускорения частиц в сверхзвуковых ( $M = 2,0 \div 3,0$ ) соплах прямоугольной конфигурации. В рамках представлений, применяемых при анализе газотермического напыления, проведены оценки скорости образования связей в контакте холодная частица — холодная подложка, реализуемом при газодинамическом напылении.

Сущность традиционных газотермических методов нанесения порошковых покрытий заключается в необходимости нагрева дисперсного материала до температуры плавления или выше, ускорения и переноса его до поверхности высокотемпературными струями. В результате происходят сложные физико-химические процессы, включающие в себя реакции окисления, выгорания мелкодисперсных порошков, разложение ряда материалов и т. п. [1, 2]. Таким образом, наряду с позитивными процессами в этом случае реализуется и негативные, связанные с использованием высокотемпературных потоков газа или плазмы. К настоящему времени предложены и реализуются подходы, позволяющие уменьшить влияние негативных факторов на физико-технические характеристики покрытий и связанные в основном с оптимизацией процессов газотермического напыления.

Метод «холодного» газодинамического напыления (ХГН) [3] позволяет решить эту важную проблему принципиально иным путем, используя в качестве основной не тепловую, а кинетическую энергию напыляемых частиц, ускоряемых холодным газом, и тем самым нивелировать негативные высокотемпературные эффекты.

**Описание установки.** Для проведения экспериментов по изучению основных закономерностей формирования покрытий методом ХГН возникла необходимость создания экспериментальных установок, обеспечивающих регулируемое изменение основных параметров газопорошкового потока. С этой целью проведены методические исследования [4], и на их основе создана экспериментальная установка, схематическое изображение которой показано на рис. 1. Основными элементами установки являются: узел напыления 1, состоящий из форкамеры и плоского сверхзвукового сопла, подогреватель газа 2, дозатор частиц 3, источник сжатого воздуха 4, источник гелия 5, камера напыления 6, координатник 7 для перемещения напыляемой подложки, пульт управления и контроля параметров (давление газа в форкамере и дозаторе, температура газа в форкамере) 8, сепаратор частиц 9. Установка обеспечивала возможность ускорения частиц размером  $d_{\text{ч}} = 1 \div 50$  мкм в сверхзвуковых соплах до скорости  $v_{\text{ч}} = 200 \div 1200$  м/с при различной их концентрации.

Большинство применяемых для холодного газодинамического напыления порошков

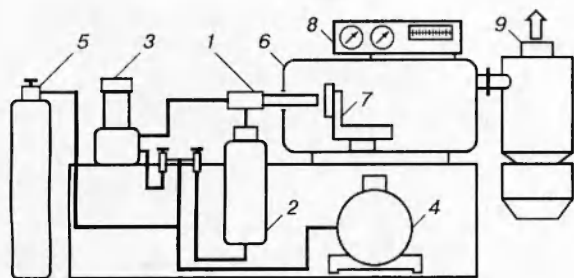


Рис. 1

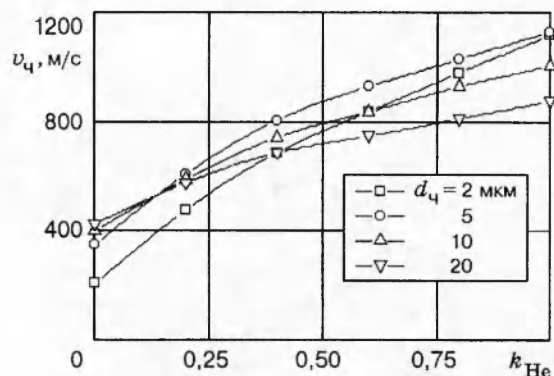


Рис. 2

имеют размеры частиц  $1 \div 50$  мкм. Такие частицы обладают плохой сыпучестью, что затрудняет использование многих традиционных способов дозирования порошка с помощью заслонок, шнеков и других подобных устройств (даже с применением вибраторов). Поэтому основные проблемы при создании данной установки были связаны с формированием струй с заданной регулируемой концентрацией частиц. На основе проведенных исследований были созданы смесители-дозаторы барабанного типа. Испытания смесителей-дозаторов показали их высокую надежность при отсутствии заметных пульсаций концентрации частиц в струе. Применялся также порционный дозатор, позволяющий вводить в поток газа заданное количество порошка  $M_0$  за время  $\Delta t < 1$  с, что важно при использовании в качестве ускоряющего газа дорогостоящего гелия. Кроме того, данная конструкция дозатора позволяла проводить быструю замену порошка в тех случаях, когда проверялась только возможность напыления различных порошков на ту или иную подложку.

На основе экспериментов [4] для реализации метода ХГН были выбраны плоские сопла, обеспечивающие минимальную толщину сжатого слоя газа перед преградой. Меньший размер выходного сечения сопла  $h = 3$  мм при длине сверхзвуковой части сопла  $L = 80 \div 120$  мм и числе Маха  $M = 2,0 \div 3,0$ , что позволило получить сверхзвуковую двухфазную струю с необходимой скоростью частиц.

Для ускорения частиц применялись два способа, основанные на изменении скорости звука рабочего газа. В первом в качестве ускоряющего газа использовалась смесь газов с различным молекулярным весом — воздуха и гелия при комнатной температуре. Регулировка скорости истечения рабочего газа осуществлялась путем изменения концентрации компонентов в смеси.

На рис. 2 приведены расчетные зависимости скорости частиц алюминия у поверхности подложки от концентрации гелия  $k_{He}$  при  $L = 0,1$  м,  $M = 2,35$ ,  $p_0 = 1,5$  МПа. Видно, что, меняя состав смеси от чистого воздуха до чистого гелия, можно изменять скорость соударения частиц с подложкой от 200 до 1200 м/с. Это позволило провести эксперименты по изучению особенностей нанесения покрытий в режиме двухфазная струя — движущаяся преграда при комнатной температуре и, что особенно важно, проследить влияние на этот процесс скорости частиц в чистом виде.

Однако необходимо отметить, что использование газов (гелия, водорода) со скоростью звука, большей, чем у воздуха, ограничивает возможности практического применения метода ХГН ввиду их дефицитности, более высокой стоимости и (для водорода) повышенной

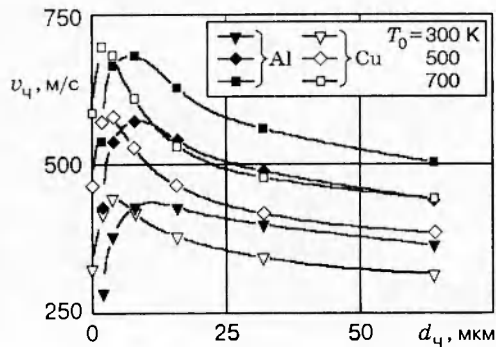


Рис. 3

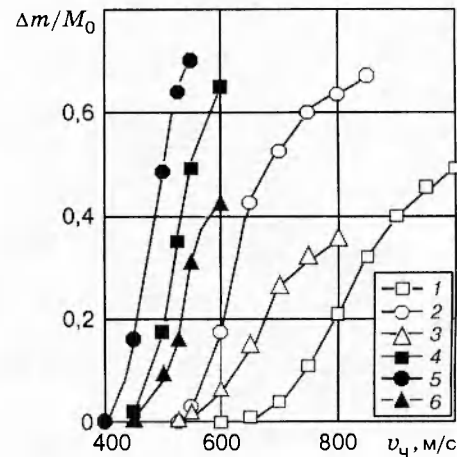


Рис. 4

опасности. В связи с этим был рассмотрен второй способ разгона частиц воздушной струей с небольшим подогревом [5]. Нагрев газа осуществлялся омическим нагревателем, позволяющим изменять температуру газа струи в пределах  $300 \div 700$  К. Основная масса газа (рабочего) нагревалась до заданной температуры и смешивалась в форкамере с малым количеством холодного газа ( $\sim 1\%$ ), несущего частицы от дозатора. С увеличением температуры воздуха в форкамере возрастали скорость звука в струе, скорость ее истечения и скорость частиц, что хорошо видно из рис. 3, где приведены полученные расчетным путем (для  $L = 0,1$  м,  $M = 2,35$ ,  $p_0 = 1,5$  МПа) скорости частиц алюминия и меди у поверхности подложки в зависимости от температуры воздуха в форкамере.

Созданная установка позволила провести цикл экспериментальных исследований по изучению особенностей нанесения покрытий методом ХГН в режиме двухфазная струя — движущаяся преграда.

**Экспериментальные результаты.** Ниже представлены результаты экспериментов по определению (в зависимости от скорости частиц) коэффициента напыления частиц  $\Delta m / M_0$ , характеризующего отношение прироста массы подложки  $\Delta m$  к общей массе израсходованного порошка  $M_0$ . Покрытия наносились на неподвижные подложки при строго дозированных порциях различных металлических порошков с размерами частиц  $1 \div 50$  мкм. Масса напыленного материала  $\Delta m$  в каждом опыте измерялась на аналитических весах как разница массы подложки до и после напыления. По известным экспериментальным значениям  $\Delta m$  и  $M_0$  строилась зависимость  $\Delta m / M_0 = f(v_p)$ . Экспериментальные значения коэффициента напыления для порошков алюминия, меди и никеля в зависимости от скорости частиц, полученные при ускорении частиц смесью воздуха с гелием, приведены на рис. 4 (кривые 1–3), откуда видно, что для исследованных металлических частиц ( $d_p < 50$  мкм) существует критическая скорость  $v_{кр} \approx 500 \div 600$  м/с взаимодействия их с подложкой. При  $v_p < v_{кр}$  наблюдается классический процесс эрозии [6], при  $v_p > v_{кр}$  он переходит в процесс напыления, т. е. в формирование на поверхности подложки плотного металлического слоя, причем с дальнейшим увеличением скорости характер формирования покрытия резко изменяется. В частности, значение коэффициента напыления для исследованных порошков увеличивается от нуля до  $0,4 \div 0,8$  при  $v_p \approx 1000$  м/с.

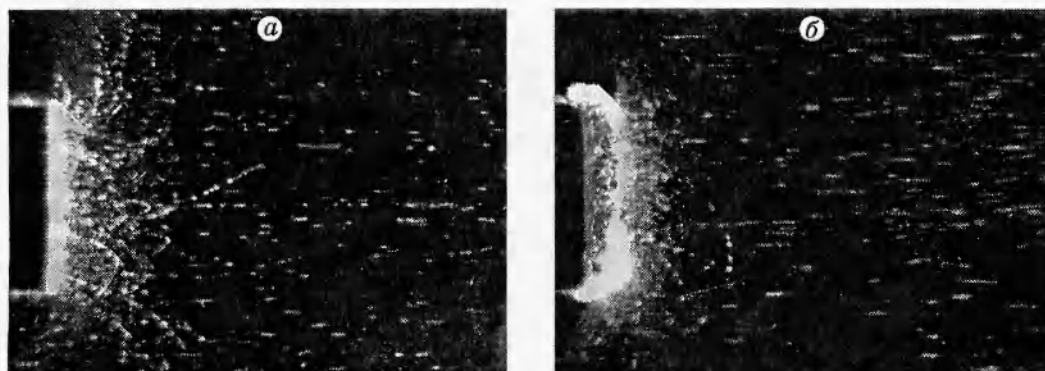


Рис. 5

Эффект перехода от эрозии к напылению наглядно демонстрируется приведенными на рис. 5 фотоснимками траекторий набегающих и отраженных от подложки частиц алюминия. Обработка подобных фотоснимков совместно с изучением поверхности подложки показала, что при  $v_{\text{ч}} \leq v_{\text{кр}}$  ( $v_{\text{ч}} \approx 250$  м/с, рис. 5,а) одиночные частицы полностью отражаются. С увеличением скорости в диапазоне  $v_{\text{ч}} > v_{\text{кр}}$  характер взаимодействия частиц с подложкой резко меняется — на поверхности подложки формируется быстро растущий слой покрытия ( $v_{\text{ч}} \approx 900$  м/с, рис. 5,б).

Таким образом, представленные выше результаты показали, что, используя сверхзвуковую струю газа, имеющую температуру торможения  $\sim 300$  К, можно получить покрытия из большинства металлов с размерами частиц  $d_{\text{ч}} < 50$  мкм.

На рис. 6 представлены экспериментально полученные значения коэффициента напыления порошков алюминия, меди и никеля на медные подложки в зависимости от температуры воздуха в форкамере. На рис. 4 кривыми 4–6 соответственно для указанных материалов представлены эти же данные, но уже в зависимости от скорости частиц, взятой из расчета (при соответствующих температурах нагрева воздуха). Из сравнения этих зависимостей с зависимостями, полученными с использованием в качестве разгоняющего газа смеси воздуха с гелием при  $T_0 = 300$  К, можно сделать вывод о существенном влиянии также температуры частиц и подложки на процесс напыления, так как в противном случае эти два семейства зависимостей совпали бы. С увеличением температуры воздуха в форкамере растет не только скорость, но и температура частиц и подложки. Поэтому наблюдаемое резкое увеличение коэффициента напыления объясняется, по-видимому, ростом как скорости напыляемых частиц (что увеличивает давление и температуру в контакте в момент удара), так и температуры напыляемых частиц и подложки (что приводит к изменению их пластичности, повышению температуры в контакте частица — подложка и, следовательно, смещению в сторону более низких значений критической скорости  $v_{\text{кр}}$ ).

Таким образом, проведенные исследования показали, что при использовании сверхзвуковой ( $M = 2,0 \div 3,0$ ) воздушной струи с небольшим подогревом ( $\Delta T \leq 400$  К) можно получить покрытия из большинства металлов и многих сплавов (Al, Cu, Ni, Zn, Pb, Sn, V, Co, Fe, Ti, бронза, латунь и др.) на различные подложки из металлов и диэлектриков (в частности, стекло, керамику и т. д.). Нагревая струю гелия и тем самым обеспечивая  $v_{\text{ч}} \geq 1200$  м/с, нам удалось получить покрытия из тугоплавких металлов (Nb, Mo и W). При этом коэффициент напыления порошков может достигать  $0,5 \div 0,8$ , что имеет

чрезвычайно важное практическое значение при разработке конкретных технологических процессов.

**Обсуждение результатов.** Рассмотрим некоторые особенности процесса формирования газодинамических покрытий в рамках подхода, широко используемого при анализе газотермических покрытий [1, 2, 7]. Скорость образования химических связей в контакте частица — подложка в этом случае записывается в виде

$$\frac{dN}{dt} = (N_0 - N)\nu \exp(-E_a/kT_k), \quad (1)$$

где  $T_k$  — температура в зоне контакта;  $N_0$  — общее число атомов на единице поверхности подложки или поверхности частицы, находящихся в физическом контакте;  $\nu$  — частота собственных колебаний атомов в решетке (обычно принимается  $\nu \approx 10^{13} \text{ с}^{-1}$ );  $E_a$  — энергия активации процесса взаимодействия.

Из уравнения (1) можно оценить относительное число связей, образованных в результате протекания реакции в контакте (приняв  $E_a$  и  $T_k$  средними за время контакта  $t_k$ ):

$$N/N_0 = 1 - \exp[-\nu t_k \exp(-E_a/kT_k)]. \quad (2)$$

Из (2) следует, что при  $T_k \geq E_a/k \ln(\nu t_k)$  относительное число связей  $N/N_0 \geq 1 - 1/e \approx 0,63$  и быстро растет с увеличением  $T_k$ . Такое число связей обычно считается достаточным для напыления.

Энергия активации процесса  $E_a$  зависит от давления в зоне контакта — с ростом давления значение энергии активации уменьшается и приближается к теоретически рассчитанному значению как к пределу. Например, для алюминия предельное значение энергии активации равно  $0,5 \cdot 10^{-19}$  Дж и достигается при  $p \geq 100$  МПа [8].

Среднее напорное давление  $p_{cp}$  на площади контакта оценим, используя уравнение импульсов  $t_k p_{cp} S_n = \rho_{ch} (\pi d_{ch}^3/6) v_{ch}$ , где  $S_n$  — среднее значение площади действия напорного давления;  $\rho_{ch}$  — плотность материала частицы;  $v_{ch}$  — скорость соударения частицы с подложкой. Время контакта оценим как время равнозамедленного движения тыльной точки частицы от  $v = v_{ch}$  до  $v = 0$ :  $t_k = 2\varepsilon_{ch} d_{ch}/v_{ch}$ . При ударе частицы алюминия с характерной скоростью  $v_{ch} \approx 500$  м/с ее деформация  $\varepsilon_{ch}$ , определенная по микроскопическим наблюдениям, равна  $\approx 0,5$ . За площадь действия напорного давления при таких деформациях можно принять площадь миделева сечения частицы  $S_n = \pi d_{ch}^2/4$ . Подставляя все данные в уравнение импульсов, получим  $p_{cp} \approx \rho_{ch} v_{ch}^2/3\varepsilon_{ch}$ . Подстановка  $\rho_{ch} = 2700 \text{ кг/м}^3$  и  $v_{ch} \approx 500$  м/с дает  $p_{cp} = 450$  МПа, и поэтому при оценках можно брать предельное значение энергии активации  $E_a = 0,5 \cdot 10^{-19}$  Дж. Подставляя  $E_a = 0,5 \cdot 10^{-19}$  Дж,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град,  $\nu \approx 10^{13} \text{ с}^{-1}$  и значение  $t_k$ , определенное выше, в выражение  $T_k \geq E_a/k \ln(\nu t_k)$ , получим  $T_k \geq 260$  К для  $d_{ch} = 50$  мкм,  $T_k \geq 300$  К для  $d_{ch} = 10$  мкм и  $T_k \geq 365$  К для  $d_{ch} = 1$  мкм.

Таким образом, из данных оценок следует, что при характерном для газодинамического напыления давлении, реализуемом в зоне контакта одиночной частицы с подложкой, для образования необходимого числа химических связей за время контакта для частиц всех размеров достаточна температура в зоне контакта  $T_k \geq 365$  К. Такая температура обеспечивается локальным нагревом при пластической деформации в зоне контакта частицы с подложкой. Если считать, что вся кинетическая энергия частицы при деформации переходит в тепловую, равномерно распределенную по объему частицы, то повышение температуры за счет деформации можно определить как  $\Delta T_k \approx v_{ch}^2/2c_p$  ( $c_p$  — теплоемкость материала частицы). Например, для частицы алюминия  $\Delta T_k \approx 140$  К при  $v_{ch} \approx 500$  м/с и  $\Delta T_k \approx 560$  К при  $v_{ch} \approx 1000$  м/с. Учитывая, что выделение тепла зависит от степени деформации, которая наиболее интенсивна в области контакта, можно считать  $\Delta T_k \geq v_{ch}^2/2c_p$ .

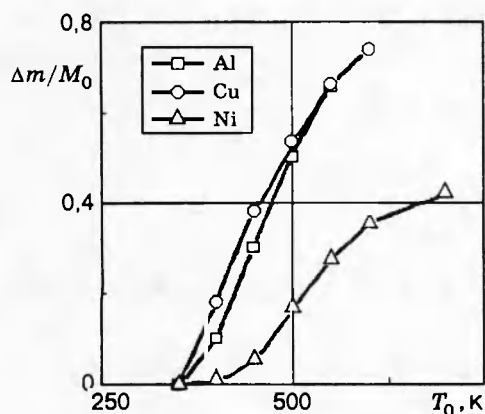


Рис. 6

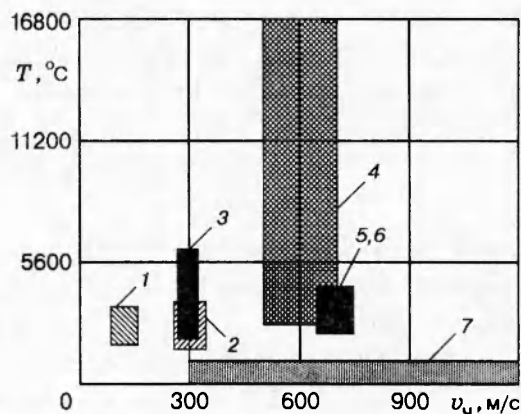


Рис. 7

Приведенные оценки показывают, что образование соединения в контакте холодная частица — холодная подложка, реализуемое при газодинамическом напылении, вполне может быть описано в рамках представлений, применяемых при анализе газотермического напыления [1, 2, 7].

В заключение определим место метода ХГН среди других методов газотермического напыления. На рис. 7 представлена диаграмма, показывающая характерные диапазоны температур и скоростей частиц для метода холодного газодинамического напыления в сравнении с известными газотермическими методами (1 — порошковый газопламенный, 2 — газопламенный из проволоки, 3 — электродуговой, 4 — плазменный, 5 — детонационный, 6 — высокоскоростной газопламенный, 7 — газодинамический). Как видно из диаграммы, отличительной особенностью метода ХГН является возможность получения покрытий при температуре струи  $0 \div 500$  °С, меньшей температуры плавления материала частиц, в связи с этим отсутствуют эффекты высокотемпературного окисления, испарения, плавления, кристаллизации, газовыделения и т. д., характерные для газотермических методов. К преимуществам метода относятся:

- возможность получения покрытий со свойствами, близкими к свойствам материала исходных частиц;
- возможность получения композиционных покрытий из металлической смеси порошков, различающихся по физико-химическим свойствам;
- получение покрытий из порошков с размером частиц менее 1 мкм;
- отсутствие существенного термического воздействия на изделие;
- повышение безопасности работ в связи с отсутствием высокотемпературных струй и излучения, простота технической реализации;
- отсутствие энергонапряженных узлов, обеспечивающее высокий ресурс при эксплуатации;
- возможность сбора и повторного использования частиц в напылении.

Таким образом, проведенные исследования показали, что для получения покрытий необходимо, чтобы частицы имели температуру, близкую к температуре плавления материала частицы, что характерно для традиционных газотермических методов [1, 2, 7]. В ряде случаев целесообразно снизить температуру частиц при одновременном увеличении их скорости, что позволяет перейти к более простым с технической точки зрения устрой-

ствам для напыления, обеспечивая реализацию технологических процессов компактирования материалов и формирования покрытий из веществ (сплавов), легко разлагающихся в условиях газотермического напыления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Кудинов В. В.** Плазменные покрытия. М.: Наука, 1977.
2. **Кудинов В. В., Пекшев П. Ю., Белашенко В. Е. и др.** Нанесение покрытий плазмой. М.: Наука, 1990.
3. **Патент РФ № 1618778.** Способ получения покрытий / А. П. Алхимов, В. Ф. Косарев, Н. И. Нестерович, А. П. Папырин. Открытия. Изобретения. 1991. № 1.
4. **Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф., Папырин А. Н.** Газодинамическое напыление. Исследование плоской сверхзвуковой двухфазной струи // ПМТФ. 1997. Т. 38, № 2. С. 176–183.
5. **Патент РФ № 1773072.** Способ нанесения металлопорошковых покрытий / А. П. Алхимов, В. Ф. Косарев, Н. И. Нестерович, А. П. Папырин. Открытия. Изобретения. 1991. № 1.
6. **Эрозия** / Под ред. К. Прис. М.: Мир, 1982.
7. **Шоршоров М. Х., Харламов Ю. А.** Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. М.: Наука, 1978.
8. **Осипов К. А.** Некоторые активируемые процессы в металлах и сплавах. М.: Изд-во АН СССР, 1962.

*Поступила в редакцию 10/VII 1996 г.*

---