ХОЛОДНОЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ НА МАТЕРИАЛЫ С НИЗКОЙ ЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТЬЮ

Шикалов В.С., Клинков С.В.

Институт теоретической и прикладной механики им С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Известно, что метод ХГН [1] применим для получения покрытий на поверхностях, которые не разрушаются при ударе микрочастиц (например, металлах, сплавах, прочных керамиках). Устоявшаяся основная идея заключается в том, чтобы придать частицам достаточно высокую скорость, выше некоторой критической, начиная с которой формируется покрытие (типичная величина составляет 400 – 600 м/с в зависимости от напыляемого материала), причём, чем выше скорость, тем выше коэффициент напыления.

В случаях, когда эрозионная стойкость материала преграды оказывается недостаточной, чтобы противостоять удару частиц, то вместо процесса напыления наблюдается процесс эрозии. Типичным примером такой преграды является кирпич. Долгое время считалось невозможным получать покрытия методом ХГН на подобного рода материалах.

Для успешного образования покрытия в данном случае необходимо снизить ударное воздействие путём уменьшения скорости удара. В зависимости от прочностных свойств материала, на который требуется нанести покрытие, необходимо подбирать скорость удара частиц, чтобы уберечь поверхность от эрозии, но при этом сформировать на ней покрытие.

Приемлемая схема экспериментального осуществления данных условий может быть основана на применении эжекторных сопел [2], достоинство которых заключается в сбалансированном подсосе необходимого количества газа из среды с атмосферным давлением. Конструкция этих сопел позволяет проводить настройку на различные режимы работы (различные числа Маха, давления, степень подсоса), соответственно, различные скорости частиц.

Одной из важных подзадач является подбор подходящей формулы для расчета размеров кратера от удара одиночных частиц. Такие формулы имеются в литературе, однако, до сих пор их применимость к условиям удара, реализуемым при ХГН, остаётся невыясненной. Для этого требуется в первую очередь экспериментальное изучение размеров кратеров, оставляемых частицами известного размера при ударе с известной скоростью и последующий анализ полученных результатов.

Выражение Германа и Джонса [3] для нахождения глубины кратера:

$$h_{cr} = 0.6 \left(\frac{\rho_p}{\rho_s}\right)^{\frac{2}{3}} d_p \ln\left(1 + \left(\frac{\rho_p}{\rho_s}\right)^{\frac{2}{3}} \frac{\rho_s v_p^2}{\text{HB}_s}\right) (1)$$

где h_{cr} – глубина кратера, ρ_p – плотность частицы, v_p – скорость частицы, d_p – диаметр частицы, ρ_s – плотность преграды, HB_s – твёрдость преграды по Бринеллю.

Можно предположить, что коэффициент 0,6 в формуле был найден с точки зрения наилучшего совпадения с имеющимися у авторов экспериментальными результатами. При ударе частиц в условиях близких к ХГН он может оказаться, вообще говоря, другим, поэтому, далее его значение было скорректировано в соответствии с полученными в данной работе экспериментальными результатами.

Сделаем ещё одно замечание. В данной работе проводилось измерение микротвёрдости по методу Виккерса. Известно, что в определённом диапазоне обе величины оказываются близкими друг к другу. Поэтому вполне правомерна замена твёрдости по Бринеллю твёрдостью по Виккерсу, а возникающие несоответствия исправляются подбором коэффициента перед формулой.

При напылении использовалась схема экспериментальной установки, основными узлами которой являются: камера напыления с системой вытяжной вентиляции, нагреватель рабочего газа (воздуха), дозатор порошка барабанного типа и форкамерносопловой блок.

В экспериментах использовались два сопла: сверхзвуковое сопло с диаметром критического сечения 3,6 мм, диаметром выходного сечения 6 мм и длиной сверхзвуковой части 100 мм и эжекторное сопло (рис. 1) с диаметром выходного сечения 5 мм и длиной сверхзвуковой части 80 мм. Сопла с нагревателем были смонтированы на промышленный 6осевой робот KUKA KR 16-2 (KUKA Roboter GmbH).



Рис. 1. Схема реализации ХГН с помощью эжекторного сопла: 1 – сопло, 2 – форкамера, 3 – подача газа, 4 – центральное тело, 5 – подача порошка, 6 – дозатор, 7 – критическое сечение сопла, 8 – ввод частиц, 9 – выходное сечение сопла

Конструкция, представленная на рис. 1, позволяет подстройку за счёт перемещения конуса центрального тела вдоль оси, что влияет на значение коэффициента эжекции. Были использованы две геометрические конфигурации эжектора с диаметрами канала в центральном теле $d_a = 2$ мм и $d_a = 4$ мм, полуугол конуса центрального тела равен 14°. Эжектирующий (рабочий) газ подаётся в форкамеру с заданным давлением *p*0 (типичная величина 1...2 МПа) и температурой торможения *T*0 (обычно в пределах 300...800 К).

Напыляемый порошок АСД-1 с характерным диаметром частиц порядка 30 мкм. Для измерения скорости частиц используется метод лазер-трёхимпульсной тенеграфии. Длительность импульса света 20 нс, время между первыми двумя импульсами 200 нс, между вторыми двумя 400 нс, точность измерения 5 м/с. Условия измерения совпадают с условиями соударения о медную преграду ($p_0 = 1,5$ МПа, $T_0 = 300$ K).

Полученные данные подтверждают, что для эжекторного сопла с da = 4 мм характерны более низкие скорости частиц (около 300 м/с), в то время как для сопла с da = 2 мм скорости практически равны скоростям типичного сверхзвукового сопла (около 400 м/с). Это отличие в скоростях объясняется тем, что эжекторные сопла отличаются геометрией, что приводит к отличиям в характеристиках газового потока и, соответственно, скорости частиц.

С помощью оптической профилометрии, были измерены размеры кратеров на поверхности медной подложки (средний диаметр 29 мкм, средняя глубина 9 мкм). Средняя глубина примерно в 3 раза меньше среднего диаметра частицы. Кратеры были получены при скорости частиц 400 м/с.

Измерения микротвёрдости проводились по методу Виккерса. Твёрдость медной подложки составила 1144 ± 34 МПа. Расхождение между экспериментальными данными при измерении микротвёрдости кирпича можно объяснить неоднородностью материала. В зависимости от места приложения нагрузки получаются разные значения микротвёрдости. При расчёте глубины проникания частицы будем пользоваться средней величиной 500 МПа.

Имея экспериментально полученные результаты по измерению среднего размера частиц, средней скорости их удара, микротвёрдости материала подложки, и средней глубины кратеров, в формуле (1) был найден поправочный коэффициент 1,15 вместо 0,6 изначально заложенного в ней (2).

$$h_{cr} = 1.15 \left(\frac{\rho_p}{\rho_s}\right)^{\frac{2}{3}} d_p \ln\left(1 + \left(\frac{\rho_p}{\rho_s}\right)^{\frac{2}{3}} \frac{\rho_s v_p^2}{\text{HV}_s}\right)$$
(2)

На рис. 2 представлены образцы взаимодействия гетерогенного потока с поверхностью кирпича. На рис. 2a виден след эрозии частицами алюминия при ускорении их в сверхзвуковом сопле Лаваля (типичный режим получения покрытий на металлических подложках). На рис. 26 представлено сплошное алюминиевое покрытие на поверхности кирпича, полученное с помощью эжекторного форкамерносоплового узла. Важно отметить, что температура торможения воздуха в обоих случаях была одинакова ($T_0 = 550$ K). Отметим, что напыление происходит только при ускорении частиц в эжекторном сопле с $d_a = 4$ мм, при ускорении в эжекторном сопле с $d_a = 2$ мм происходит эрозия, также как и в случае со сверхзвуковым соплом Лаваля.



Рис. 2. Результаты взаимодействия гетерогенного потока с поверхностью кирпича: а – эрозия поверхности при типичном режиме напыления с помощью сверхзвукового сопла, б – сплошное покрытие из алюминия на поверхности кирпича.

Из этих результатов следует, что при скорости удара частиц около 400 м/с происходит эрозия поверхности кирпича, но при скорости 300 м/с происходит напыление. Таким образом, для данного материала имеется пороговая скорость, значение которой лежит в интервале 300 – 400 м/с, начиная с которой начинается сильная эрозия.

Подстановка в формулу (2) плотности (2100 кг/м³) и средней микротвёрдости (500 МПа) кирпича даёт ожидаемые величины проникания частиц. Так, для скорости удара 300 м/с глубина проникания оказывается порядка половины диаметра частицы (17 мкм), а при скорости 400 м/с – 28 мкм. Есть предположение, что имеется пороговая глубина проникания частиц в материал, которая примерно равна 0,5 – 0,7 диаметра частицы, выше которой материал начинает эродировать.

Таким образом, экспериментально была показана возможность получения покрытий методом ХГН на материалах склонных к эрозионному разрушению путём уменьшения скорости удара частиц. Хотя при этом снижается коэффициент напыления, однако, для формирования начального слоя частиц, который в последующем экранирует (защищает) материал подложки от эрозии, данное обстоятельство не является существенным.

Список литературы:

- Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика // М.: Изд-во Физматлит, 2010.
- Клинков С.В., Косарев В.Ф., Сова А.А. Исследование эжекторной схемы формирования гетерогенных сверхзвуковых потоков в условиях холодного газодинамического напыления // Теплофизика и аэромеханика. 2006. Т. 13, № 3.
- Herrman W., Jones A.H., Proc. Symp. Hypervelocity Impact, 5th, Denver, Colorado, Oct. 1961.