

## ЛИТЕРАТУРА

1. V. V. Mitrofanov. Acta Astronautica, 1976, 3, 11—12.
2. А. М. Мардашев. ПМТФ, 1977, 2.
3. М. Я. Иванов, А. Н. Крайко, Н. В. Михайлов. ЖВМ и МФ, 1972, 2.
4. К. П. Станюкович. Неустановившиеся движения сплошной среды. М., Наука, 1971.
5. А. М. Мардашев, В. В. Митрофанов, И. Т. Бакиров.— В сб.: Детонация. Черногловка, 1978.
6. В. В. Митрофанов. ФГВ, 1975, 11, 1.
7. В. Ф. Лобанов. ПМТФ, 1975, 5.

## СКОРОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРА ЧАСТИЦ ПРИ ДЕТОНАЦИОННОМ НАПЫЛЕНИИ

*А. М. Гладилин, С. С. Баргенов*  
(Москва)

Метод детонационного газового напыления покрытий продуктами детонации газовой смеси, заключающийся в нагреве и разгоне частиц напыляемого материала в открытом с одного конца стволе, находит в настоящее время все более широкое распространение. Это объясняется тем, что свойства детонационных покрытий значительно превосходят технические характеристики покрытий других типов [1, 2]. Для совершенствования технологии детонационного напыления необходим количественный анализ температуры и скорости напыляемых частиц при различных режимах процесса. Одним из основных условий получения качественных покрытий является правильный выбор глубины загрузки наполняемого порошка [1], т. е. расстояния от открытого конца ствола до места ввода наполняемого материала.

Неоднократно предпринимались попытки расчетного определения зависимости скорости частиц от глубины загрузки [3, 4]. Однако полученные при расчете значения оптимальной глубины загрузки, соответствующие максимальной скорости частиц, не согласуются с имеющимися экспериментальными данными [1, 2]. Подобное расхождение, по нашему мнению, объясняется допущениями, использованными в указанных работах. Так, в [3] вводится условие, что скорость и плотность продуктов детонации линейно уменьшаются при удалении от фронта детонационной волны. Также принято, что на расстояниях от фронта волны, превышающих половину расстояния до закрытого конца трубы, где инициировалась детонация, скорость продуктов равна нулю, а плотность их постоянна. Предполагается также, что скорость и плотность газового потока в различных точках ствола не изменяются в процессе истечения продуктов после достижения детонационной волной открытого конца ствола.

В работе [4] помимо других вводится предположение, что от закрытого конца ствола, где инициируется детонация, к его открытому концу столб неподвижного газа увеличивается со скоростью  $\approx 0,5 D$ , где  $D$  — скорость распространения детонационной волны. Таким образом, например, при условиях, показанных на рис. 1 и 2, из этого предположения следует, что истечение продуктов детонации из ствола продолжается лишь  $8 \cdot 10^{-4}$  с, а потом внезапно прекращается. При этом внутри ствола весь газ неподвижен. Допущения, принятые в [3, 4], противоречат физической картине процессов, сопровождающих ускорение частиц продуктами детонации гремучих смесей газов, что следует как из результатов расчетов [5, 6], так и из экспериментальных данных [1, 7, 8].

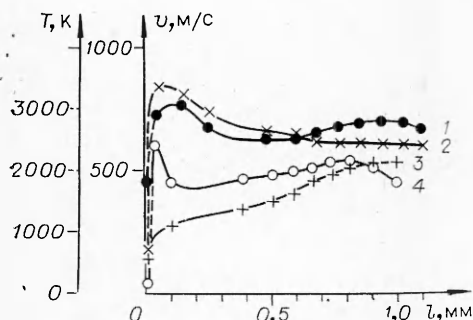


Рис. 1. Зависимость скорости  $v$  (1, 4) и средней температуры  $T$  (2, 3) частиц на выходе из ствола от глубины загрузки  $l$ ; длина ствола 2 м, его диаметр 2,5 см, плотность частиц  $3 \text{ г/см}^3$ , относительная объемная концентрация твердой фазы  $10^{-4}$ .  
1, 2 —  $r=5 \text{ мкм}$ ; 3, 4 —  $r=50 \text{ мкм}$ .

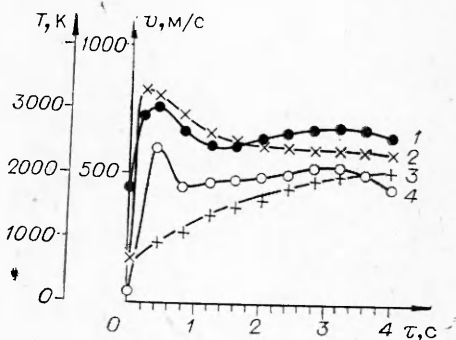


Рис. 2. Зависимость  $v$  и  $T$  частиц на выходе из ствола от времени истечения  $\tau$  (условия расчетов аналогичны рис. 1).

В настоящей работе поставлена задача расчетного определения скорости и средней температуры частиц на выходе из ствола детонационно-газовой установки в зависимости от первоначального расположения частиц в стволе (глубины загрузки  $l$ ) и от интервала времени между моментами достижения открытого конца ствола детонационной волной и меченой частицей (времени истечения  $\tau$ ). Для исследования влияния размера напыляемого порошка сделан расчет для частиц радиусом 5 и 50 мкм. Рассмотрено также влияние плотности напыляемого порошка и длины ствола на скорость частиц.

При увеличении плотности частиц и сохранении неизменными всех остальных параметров спад скорости на выходе из ствола обусловлен рядом причин, в частности уменьшением скорости продуктов детонации из-за интенсификации процесса теплоотдачи внутрь частиц. Для исключения влияния изменения теплофизических процессов использовались значения удельной теплоемкости частиц, обратно пропорциональные их плотности. Приведенные в таблице значения скорости близки к тем,

которые можно получить, фиксируя теплоемкость и изменяя объемную концентрацию частиц обратно пропорционально их плотности.

**Влияние длины ствола и плотности напыляемых частиц на их скорость на выходе из ствола**

Плотность частиц $10^{-3}, \text{ кг/м}^3$	Длина ствола, м	Радиус частиц, мкм	Время истечения, мс	Скорость частиц, м/с
3	2	5	2	650
3	2	5	4	660
3	2	50	2	490
3	2	50	4	475
3	1	5	2	590
3	1	50	2	410
9	2	50	2	440
9	2	50	4	475
9	1	50	2	275
15	2	50	4	290
15	1	50	2	210

Примечание. Удельная теплоемкость частиц с плотностью  $9000 \text{ кг/м}^3$  составляет  $0,33 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ , с плотностью  $15000 \text{ кг/м}^3$  —  $0,2 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ .

При детонационном напылении обычно используется смесь ацетилена и кислорода [1—5]. В настоящей работе расчеты сделаны для стехиометрической смеси  $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{ O}_2$ . Методика расчетов заключалась в совместном решении двух систем дифференциальных уравнений, одна из которых описывает процессы в газовой фазе, а вторая — процессы нагрева и ускорения частиц [5, 6]. Введено предположение об отсутствии плавления и испарения частиц и теплообмена со стенкой ствола. Используемые уравнения и константы, а также принятые допущения приведены в работе [6], методика расчетов подробно описана в [5]. При вычислениях использована зависимость коэффициента сопротивления частиц от числа Рейнольдса в соответствии с [9].

Приведенные на рис. 1, 2 данные показывают наличие двух максимумов на зависимости скорости от  $l$  и  $\tau$ . Найденные ранее расчетным путем, например, в [4] значения оптимальной глубины загрузки соответствуют первому максимуму (5—15 см). Экспериментально определенные оптимальные глубины загрузки значительно больше [1]. По нашему мнению, такое расхождение теории и эксперимента можно объяснить следующими причинами.

1. В расчетах принимается, что в момент инициирования детонации частицы равномерно распределены в объеме детонирующей газовой смеси. Однако при использовании одних типов дозаторов частицы расположены на нижней поверхности горизонтального ствола и в период времени, соответствующий первому максимуму, наблюдается не ускорение и нагрев частиц, а формирование двухфазного потока.

При использовании дозаторов, в которых частицы впрыскиваются инертным газом [1, 2], начальное расположение более однородно, однако облако частиц, взвешенное вблизи оси ствола, находится в момент детонации в среде, обогащенной инертным газом, где скорость и температура продуктов детонации значительно меньше, чем для чистой смеси ацетилена и кислорода. По данным работы [10] при характерном размере зоны смешивания  $\sim 1$  см перемешивание горячих и быстрых продуктов детонации и газа, окружающего частицы, происходит за время  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  с после взрыва, т. е. первый максимум скорости и температуры не реализуется.

2. При напылении достаточно крупных частиц (см. рис. 1, 2, 4), а также при напылении материалов с малой теплопроводностью, например, окислов за время  $(2 \div 5) \cdot 10^{-4}$  с порошок не прогревается в достаточной степени, поэтому из частиц, расположенных вблизи открытого конца ствола, качественные покрытия не формируются.

3. Вблизи открытого конца ствола газовая смесь в значительной степени разбавлена воздухом или продуктами детонации, оставшимися после предыдущего выстрела, поэтому здесь скорость детонационной волны значительно ниже, что должно привести к неучтенному при расчетах понижению скорости и температуры продуктов детонации, а следовательно, частиц, расположенных вблизи открытого конца ствола. Так, по данным работы [7] скорость детонации здесь понижается более чем на 500 м/с.

Проведенный анализ показывает, что при использовании всех известных установок и технологических схем [1, 2] на кривых зависимости скорости и средней температуры частиц от глубины загрузки и времени истечения максимумы, соответствующие  $l < 15$  см и  $\tau < 0,3$  мс, практически не реализуются. Этим объясняется экспериментально известный факт [1], что глубина загрузки напыляемых порошков больше 15 см.

Интересно отметить, что скорость частиц меняется сравнительно слабо при значительном изменении  $l$  и  $\tau$ . Такая зависимость скорости от  $l$  и  $\tau$  не должна приводить к резкому изменению характеристик покрытий. Наличие оптимальной глубины загрузки, по нашему мнению, нельзя объяснить, как это обычно делается, лишь максимальной скоростью частиц на выходе из ствола. Необходимо использовать комплексный подход, учитывающий скорость, температуру и концентрацию частиц, их плавление и испарение, а также процессы взаимодействия частиц и продуктов детонации с подложкой.

Анализ приведенных в таблице данных показывает сильное влияние на скорость частиц их плотности и меньше — длины ствола. Для сообщения напыляемым частицам, имеющим значительную плотность, высокой скорости необходимо использовать мелкодисперсные порошки, что обычно практически выполняется [1]. Значения скорости частиц, полученные расчетным путем в настоящей работе и в [6], значительно меньше

определенных экспериментально с использованием методики двойного диска для порошков с близкими значениями радиуса и плотности. Например, при напылении частицами алюминия с  $r > 50$  мкм зафиксирована максимальная скорость  $\sim 1100$  м/с [1], в то время как расчетное  $v \approx 500$  м/с. В работе [11] скорость частиц меди размером 20—40 мкм составляет  $\sim 1300$  м/с, при максимальном расчетном значении  $v \approx 600$  м/с. Указанное различие, по-видимому, объясняется ошибками при экспериментальном определении скорости, обусловленными взаимодействием двухфазного потока с измерительной системой [1, 8].

Приведенные в настоящей работе данные удовлетворительно согласуются с результатами, полученными методом сверхскоростной фоторегистрации [8]. Так, для частиц  $Al_2O_3$  со средним радиусом 5 мкм, плотностью  $\approx 3,9$  г/см<sup>3</sup> при  $l = 0,5$  м на выходе из ствола зафиксирована скорость  $550 \pm 100$  м/с. Несколько меньшее экспериментальное значение скорости по сравнению с расчетным (см. рис. 1) объясняется тем, что плотность окиси алюминия больше принятой при расчете (3 г/см<sup>3</sup>), а навеска напыляемого материала перед иницированием детонации располагалась на поверхности ствола, и требовалось некоторое время ( $\approx 0,1$  мс), в течение которого частицы не ускоряются, а вовлекаются в двухфазный поток.

Таким образом, предложенная методика расчета, по-видимому, позволяет получать близкие к реальным значения скорости частиц при детонационном напылении внутри ствола [5] и на выходе из него. Температура частиц может существенно отличаться от рассчитанных значений из-за процессов плавления и испарения, учет которых возможен, но выходит за рамки настоящей работы.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) зависимости скорости частиц на выходе из ствола детонационно-газовой установки от глубины загрузки  $l$  и времени истечения  $\tau$  имеют два максимума. Первый максимум, соответствующий глубине загрузки, составляющей менее 10% длины ствола (5—15 см), практически не реализуется из-за конструктивных и технологических особенностей метода детонационного напыления;

2) зависимости температуры от  $l$  и  $\tau$  качественно меняются при изменении грануляции напыляемого порошка;

3) абсолютные значения скорости частиц удовлетворительно согласуются с данными, полученными методом сверхскоростной фоторегистрации, и значительно меньше значений скорости, полученных с использованием механических систем вращения. Последнее отличие можно объяснить искажающим влиянием процессов взаимодействия сверхзвуковых двухфазных потоков с измерительными системами;

4) температура частиц на выходе из ствола достаточно велика, поэтому практически все легкоплавкие материалы (как Al или Cu) при грануляции  $\leq 100$  мкм напыляются в расплавленном состоянии. Тугоплавкие же материалы (как W) при грануляции  $\geq 10$  мкм не плавятся, поэтому возможность получения из них покрытий методом детонационного напыления проблематична.

Поступила в редакцию  
22/III 1979

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. Х. Шоршоров, Ю. А. Харламов. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. М., Наука, 1978.
2. А. П. Семенов, Ю. П. Федько, А. И. Григоров. Детонационные покрытия и их применение. М., НИИМАШ, 1977.
3. Ю. А. Харламов. Физика и химия обработки материалов, 1974, 1, 48.

4. Б. Н. Двукраев. Порошковая металлургия, 1976, 2, 36.
  5. А. М. Гладиллин. Канд. дис. Л., ЛГУ, 1975.
  6. А. М. Гладиллин, Е. И. Карпиловский, А. Д. Корнев. ФГВ, 1978, 14, 16, 123.
  7. В. С. Клименко, В. Г. Скадин и др. Физика и химия обработки материалов, 1978, 3, 53.
  8. Ю. П. Федько, С. С. Бартенев, Ю. В. Зайцев.— В сб.: Новые методы нанесения покрытий напылением. Ворошиловград, ВМИ, 1976.
  9. А. А. Борисов, Б. Е. Гельфанд и др. ФГВ, 1970, 6, 3.
  10. Г. Н. Королева, К. Г. Марин, В. К. Любимов. Электронная техника. Сер. Материалы, 1976, 6, 100.
  11. Б. Л. Рябошапко, Ю. А. Харламов.— В сб.: Новые методы нанесения покрытий напылением. Ворошиловград, ВМИ, 1976.
-