

УДК 534.222.2

РАЗГОН И НАГРЕВ ПОРОШКОВЫХ ЧАСТИЦ ПРОДУКТАМИ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В КАНАЛАХ С КОНИЧЕСКИМ ПЕРЕХОДОМ

И. С. Батраев, Е. С. Прохоров, В. Ю. Ульяницкий

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, prokh@hydro.nsc.ru

Представлены результаты численного моделирования и экспериментальной реализации процесса воздействия химически реагирующего газового потока на частицы порошка при профилировании (увеличение диаметра при сохранении объема) камеры сгорания ствола установки для детонационного напыления. Для перехода из камеры сгорания в дульную часть ствола использованы соединительные конические патрубки с малым углом сужения. Показано, что такое профилирование позволяет существенно уменьшить габариты ствола, не ухудшая технологических возможностей детонационной установки.

Ключевые слова: газовая детонация, твердые частицы, детонационное напыление.

ВВЕДЕНИЕ

Техническое применение газовой детонации обосновано стремлением быстро и эффективно преобразовать химическую энергию топлива в кинетическую энергию и теплоту. Одним из важных приложений газовой детонации является метод детонационного напыления, суть которого состоит в использовании энергии высокоскоростного и высокотемпературного потока продуктов детонации (ПД) для разгона и нагрева мелкодисперсных твердых частиц в стволе детонационной установки. Обычно ствол представляет собой открытую с одного конца трубу диаметром $15 \div 20$ мм и длиной $1 \div 2$ м (прямой ствол) [1].

Изучение межфазного взаимодействия твердых частиц с потоком химически реагирующих ПД — одна из центральных задач технологии детонационного напыления. Качество детонационных порошковых покрытий в основном определяется скоростью u_s и температурой T_s метаемых частиц [2]. Значение этих параметров частиц на вылете из ствола детонационной установки напрямую зависит от размеров области сгорания, точнее, от объема взрывчатой смеси V_c , поступающей в ствол перед выстрелом.

Работа выполнена при частичной поддержке фонда Президента РФ для ведущих научных школ (НШ-2695.2014.1), Российского научного фонда (проект № 14-11-00450) и программы фундаментальных исследований Президиума РАН (проект № 25.8).

© Батраев И. С., Прохоров Е. С., Ульяницкий В. Ю., 2014.

Для расширения возможностей метода детонационного напыления также используются и конически сужающиеся (с углом $\varphi \approx 30^\circ$) каналы, так называемые профилированные стволы. Здесь под углом конического сужения φ понимается половина угла раствора конуса. В профилированных стволах за счет пересжатия детонационной волны удается увеличить скорость u_s , а при необходимости и температуру T_s метаемых частиц [3, 4]. Однако при практической реализации такого устройства возникает неразрешимая пока проблема «паразитного» запыления конического патрубка, соединяющего широкую часть камеры сгорания с узкой дульной частью ствола, которая исчезает при малых углах φ (менее 15°). И хотя при этих углах пересжатие существенно уменьшается, такое профилирование может быть весьма полезно для оптимизации конструкции установки детонационного напыления, особенно в связи с интеграцией аппаратов напыления в роботизированные процессы. Данная работа посвящена численному моделированию и экспериментальной реализации процесса воздействия продуктов газовой детонации на порошковые частицы в профилированном канале с малым углом φ .

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводили на базе разработанного в ИГиЛ СО РАН промышленного компьютеризированного комплекса детонационного напыления CCDS2000 [5], в котором детонация реализуется внутри ствола во взрывчат-

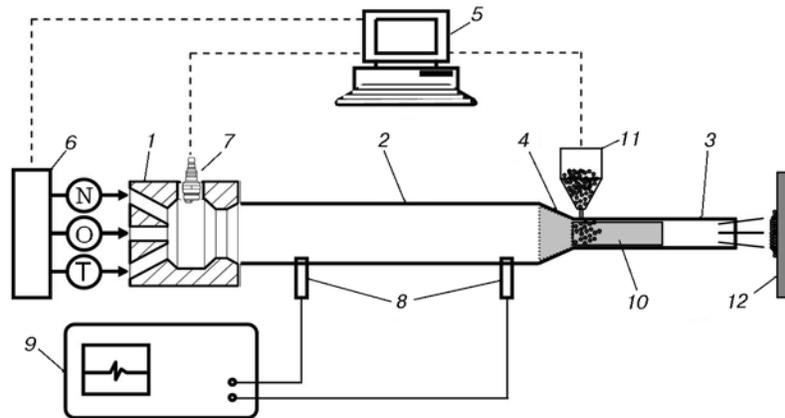


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — камера смешения-зажигания, 2 — камера сгорания, 3 — дульная секция, 4 — патрубок, 5 — управляющий компьютер, 6 — газораспределитель, 7 — свеча зажигания, 8 — датчики давления, 9 — осциллограф, 10 — закопченная фольга, 11 — дозатор, 12 — подложка

той смеси, формируемой в результате проточной подачи газовых компонентов через специализированное смесительное устройство.

Схема экспериментов представлена на рис. 1. Ствол с компактной камерой смешения-зажигания 1 (объемом $\approx 15 \text{ см}^3$) имел камеру сгорания 2 и дульную секцию 3, которые при разных диаметрах сечения соединялись коническим патрубком 4 с углом сужения $\varphi = 10^\circ$. Смесь подавалась в ствол через управляемый от компьютера 5 газораспределитель 6 комплекса CCDS2000 [6], работающий на пневмораспределителях фирмы «Festo» с временем срабатывания $3 \div 4 \text{ мс}$, обеспечивавшим при характерном времени подачи компонентов взрывчатой смеси $\approx 50 \text{ мс}$ повторяемость объема заряда не хуже $97 \div 98 \%$. Детонацию инициировали внутри специализированной камеры смешения-зажигания [7] автомобильной свечой 7. Каждый компонент взрывчатой смеси подавался через прецизионную систему стабилизации расхода. При этом для контроля получаемого состава взрывчатой смеси в камере сгорания с помощью пьезоэлектрических датчиков давления 8 и осциллографа (Tektronix TDS 2004B) 9 проводилось измерение скорости детонации на участке длиной 300 мм. Кроме того, детонационные характеристики тестировали по традиционной методике следовых отпечатков. Для этого в стволе, как правило, в дульной его части устанавливалась

закопченная пластинка из алюминиевой фольги 10 длиной 150 мм. В экспериментах с порошком он инжектировался через отверстие в боковой стенке дульной части ствола на расстоянии 9 мм от конического перехода с помощью оригинального [8] импульсного дозатора 11. Состояние частиц (твердое — расплавленное) фиксировалось по результатам их взаимодействия с неподвижной подложкой 12 в виде пластины толщиной 2 мм из нержавеющей стали. Подложка располагалась на расстоянии 10 мм от среза ствола.

Реализация одного детонационного цикла («выстрела») осуществлялась управляющей программой, интерфейс которой в виде временной циклограммы, задающей последовательность и длительность операций подготовки «выстрела», представлен на рис. 2. Заряд взрывчатой смеси формируется подачей топлива и окислителя по двум независимым каналам, возможно разбавление смеси воздухом или инертным газом (азотом, аргон и др.). После формирования заряда импульсным дозатором подается порошок, а затем инициируется детонация. По окончании «выстрела» (разгрузки давления продуктов детонации) ствол продувается воздухом или инертным газом. В циклическом режиме процесс повторяется с частотой до 10 Гц.

В качестве горючего газа в наших экспериментах использовался ацетилен, являющийся

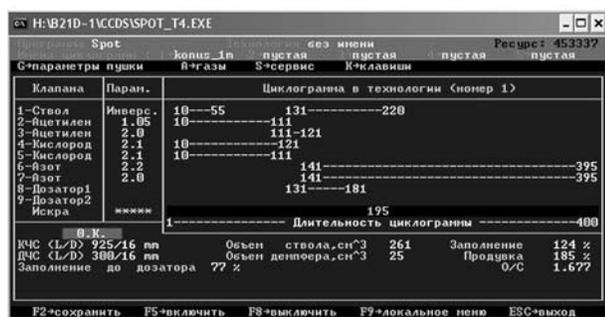


Рис. 2. Циклограмма компьютерного управления «выстрелом»

ся наиболее востребованным топливом при детонационном напылении порошковых материалов. Диаметр базового прямого ствола 16 мм. Благодаря высокой детонационной способности ацетилена, в таком стволе удастся стандартным автомобильным зажиганием напрямую (без существенных переходных участков) инициировать детонацию в широком диапазоне концентрационных соотношений с кислородом. Так, измеренный по следовым отпечаткам размер детонационной ячейки, который определяет возможности прямого инициирования, оставался заведомо меньше диаметра ствола в диапазоне концентрационного соотношения $O_2/C_2H_2 = 1 \div 10$. Причем система газопитания и управляющая программа позволяли поддерживать прямое инициирование даже в сильно обедненных (по топливу) смесях. Для этого, например, при составе основного заряда в стволе $C_2H_2 + 7.8O_2$ в камере смещения-зажигания и в ее ближайшей окрестности (но по объему не более 10 % всего заряда) формировался форсирующий заряд высокоактивной смеси $C_2H_2 + 1.07O_2$ (циклограмма на рис. 2). Измерение скорости детонации позволило проконтролировать и подтвердить высокую точность реализации концентрационных соотношений газораспределителем и эффективность смещения компонентов взрывчатой смеси. Рассчитанная скорость детонации в смеси $C_2H_2 + 7.8O_2$ составляла 1929 м/с, а ее измеренное значение — 1923 ± 10 м/с.

Прямые измерения скорости частиц при их разгоне продуктами газовой детонации [9] показывают, что заполнение ствола зарядом взрывчатой смеси, когда граница заряда располагается между дозатором порошка и срезом ствола, уже практически не влияет на скорость метаемых частиц u_s . В частности, та-

кое избыточное заполнение ствола при детонационном напылении может считаться «паразитным». Поэтому мы ограничились исследованием случая максимального ускорения частиц, который реализуется при заряде, достигающем лишь места инъекции порошка.

В экспериментах диаметр камеры сгорания варьировался: $D = 16, 20, 26$ и 33 мм, в то время как диаметр дульной части $d = 16$ мм оставался неизменным. Для всех стволов длина дульной секции L_b равнялась 0.3 м, а длина камеры сгорания L_c изменялась таким образом, чтобы ее полный объем V_c , включая конический переход, был постоянным, соответствующим объему камеры сгорания прямого ствола диаметром 16 мм и длиной 1 м ($V_c = 201$ см³).

Таким образом, общая длина прямого ствола $L = L_b + L_c$ составляла 1.3 м. По мере увеличения диаметра камеры сгорания длина L профилированных стволов уменьшается, например, $L \approx 0.56$ м при $D = 33$ мм.

Эксперименты выполнены с частицами сфероидизированного порошка нихрома ПН80Х20 (плотность материала $\rho_s = 8400$ кг/м³) узкой фракции $50 \div 56$ мкм. Анализ показал, что около 80 % отсеянных через сито частиц имели правильную сферическую форму.

Надежных методов измерения температуры частиц порошка в импульсных процессах типа детонационного «выстрела» пока не существует. Однако поскольку нас интересовал диапазон температур, включающий фазовый переход твердое — жидкое, то в этом случае точку фазового перехода можно зафиксировать, анализируя «сплэты» — результаты столкновения вылетающих из ствола частиц с установленной на выходе из ствола подложкой. Типичный пример полученных в наших экспериментах «сплэтов» представлен на фотографиях: рис. 3,а — частица перед столкновением имела температуру, равную или близкую к температуре плавления (T_m), но была еще в твердом состоянии; рис. 3,в — результат столкновения жидкой капли с подложкой; рис. 3,б — частица подлетела к подложке в полурасплавленном состоянии, поскольку в растекшейся «луже» отчетливо различимы фрагменты «нетекучего» материала, очевидно, что ее температура была в точности равна T_m (для рассмотренных частиц нихрома $T_m = 1673$ К).

Таким образом, анализируя детонационные «сплэты», можно распознать режим дето-

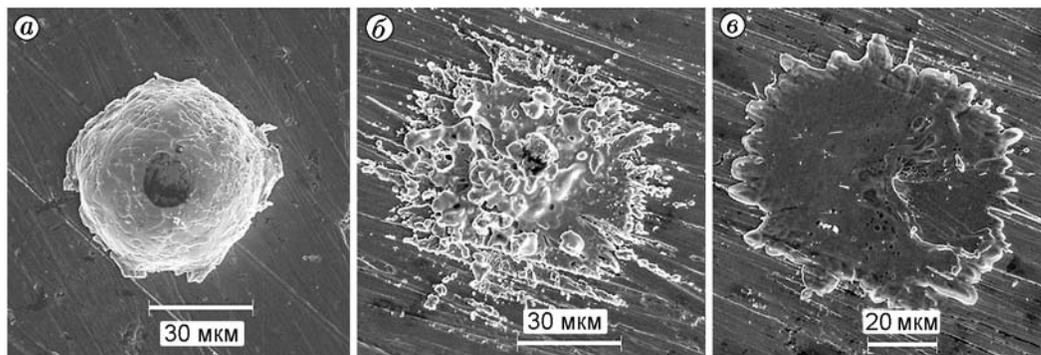


Рис. 3. Детонационные «сплэты» никромового порошка

национного «выстрела», обеспечивающий нагрев порошка в потоке продуктов детонации до температуры фазового перехода. Такая селекция была проведена по соотношению окислитель/топливо в детонирующей смеси. В качестве топлива использовался технический ацетилен марки В. Преобладание «сплэтов» типа изображенного на рис. 3, б фиксировалось при «выстрелах» зарядом смеси состава $C_2H_2 + 7.8O_2$. При концентрационном соотношении $O_2/C_2H_2 = 8.2$ наблюдались «сплэты» преимущественно того типа, что показан на рис. 3, а, а при $O_2/C_2H_2 = 7.6$ — как на рис. 3, в. На основании такого отбора в качестве базовой смеси для проведения сравнительных экспериментов с изменением геометрии камеры сгорания была выбрана смесь $C_2H_2 + 7.8O_2$, при использовании которой в случае прямого ствола формировалось покрытие в основном из частично проплавленных частиц, т. е. разогретых в точности до температуры T_m . Это позволяет с хорошей точностью верифицировать модельные расчеты.

Другим, хотя и косвенным, но имеющим практическое значение для детонационного напыления способом анализа воздействия продуктов детонации на порошок является измерение коэффициента использования порошка (КИП). Например, в [10] показано, что при детонационном напылении КИП напрямую связан с прогревом порошка, в частности, определенно отражает проплавление частиц при максимуме своего значения. Данный метод также был использован нами при обработке экспериментальных данных. Для определения КИП производилось 50 «выстрелов» на подложку с подачей 50 мг исследуемого порошка на один выстрел.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Параллельно с экспериментами было выполнено численное исследование с целью оценить влияние геометрии камеры сгорания профилированного ствола на параметры разгона частиц. Расчеты баллистики порошка внутри ствола реализованы на основе квазиодномерной математической модели, основные положения которой сформулированы в [11, 12]. Наиболее полно она изложена в работе [13]. При рассмотрении течения двухфазной среды «реагирующий газ — химически инертные частицы» внутри ствола использованы традиционные упрощающие предположения: частицы представляют собой недеформируемые сферы, не слипающиеся и не сталкивающиеся друг с другом; расстояния, на которых существенно изменяются параметры течения, велики по сравнению с размерами частиц; температура внутри частиц одинакова; вязкость и теплопроводность существенны лишь в процессах взаимодействия фаз; объем, занимаемый частицами, мал по сравнению с объемом газа. Модель позволяет описывать ускорение, нагрев, плавление, испарение и дробление неоднородных по составу частиц вплоть до вылета их из ствола. При этом учитывается возможность частичного заполнения ствола взрывчатой смесью, когда частицы в зависимости от глубины их загрузки в стволе могут разогнаться потоком ударно-сжатого инертного газа и/или химически реагирующим потоком ПД.

Анализ численного решения проведен для ацетиленокислородной смеси $C_2H_2 + 7.8O_2$. Степень заполнения ствола взрывчатой смесью соответствовала условиям эксперимента (постоянный объем камеры сгорания). Исходя из математической модели это означало, что начальное положение плоской контактной грани-

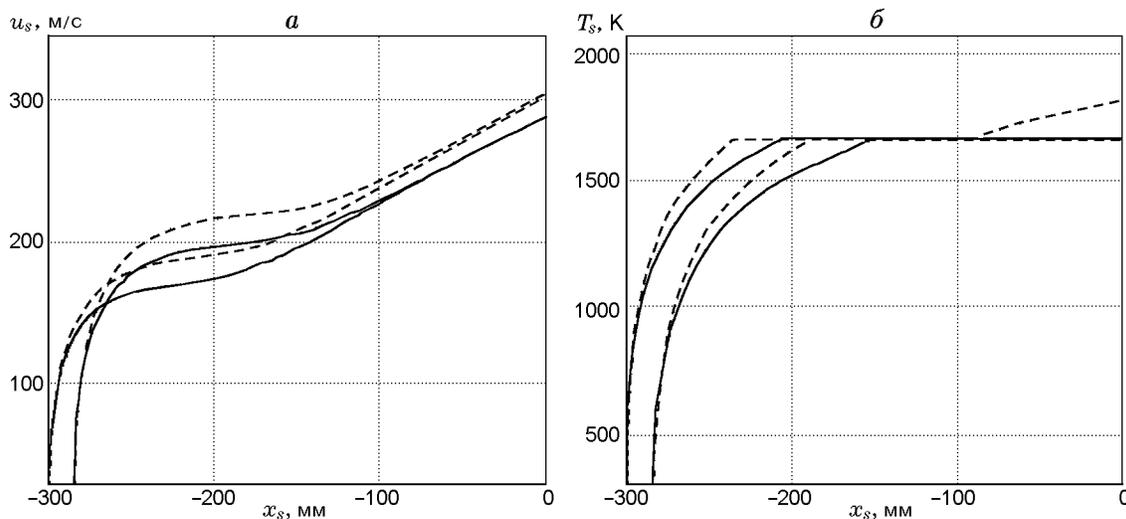


Рис. 4. Расчетные зависимости скорости (а) и температуры (б) частиц диаметром $d_s = 56$ мкм (сплошные линии) и $d_s = 50$ мкм (штриховые линии) от пройденного расстояния при различной глубине их загрузки в прямом стволе

цы, разделяющей взрывчатую смесь и инертный газ, совпадало с границей перехода из камеры сгорания в дульную часть ствола. Расчеты выполнены для единичных частиц нихрома диаметром $d_s = 50 \div 56$ мкм. Глубина загрузки частиц в дульной части ствола, если ее отсчитывать от его среза, варьировалась в диапазоне $l_s = 284 \div 300$ мм, что соответствует в эксперименте степени локализации порошка (порядка диаметра $d = 16$ мм) перед «выстрелом».

На рис. 4 для прямого ствола приведена динамика роста скорости u_s и температуры T_s метаемых частиц в зависимости от их текущей координаты x_s , отсчитываемой от среза ствола. Точки пересечения кривых на рисунке с осью абсцисс соответствуют начальному положению частиц в стволе для двух крайних значений l_s . Немонотонный характер поведения скорости u_s (рис. 4, а) однозначно связан с изменением скорости газового потока в стволе. Начальный разгон частиц (до $150 \div 200$ м/с) осуществляется газовым потоком за фронтом волны, распространяющейся в стволе. После выхода волны на срез и последующего истечения газа внутрь ствола распространяется волна разрежения. Она обуславливает рост массовой скорости газового потока и дальнейшее увеличение скорости частиц. Следует отметить, что для исследуемого диапазона значений l_s скорость частицы u_s на выходе из ствола ($x_s = 0$) определяется только ее диаметром и практически не зависит от глубины загрузки. Такая тен-

денция сохраняется и при моделировании разгона частиц в профилированных стволах.

Горизонтальные участки кривых на рис. 4, б соответствуют температуре плавления T_m . Видно, что все частицы на выходе из прямого ствола полностью или частично расплавлены. Этот результат согласуется с экспериментом и подтверждает правильность выбора химического состава взрывчатой смеси для дальнейших исследований влияния геометрии камеры сгорания при использовании профилированных (сужающихся) стволов на процесс детонационного напыления.

Степень проплавления частицы $\delta_s = (\Delta m_s / m_s) \cdot 100\%$ ($\Delta m_s / m_s$ — доля расплавленного вещества частицы массой $m_s = \rho_s \pi d_s^3 / 6$) определяется не только температурой газового потока, обтекающего частицу, но и временем ее пребывания в стволе. Поэтому у частиц одинакового диаметра d_s степень проплавления возрастает с увеличением глубины их загрузки l_s . Например, для частицы диаметром $d_s = 56$ мкм при $l_s = 284$ мм в прямом стволе $\delta_s = 64\%$, а при $l_s = 300$ мм степень проплавления достигает 97% .

Отметим, что в расчетах увеличение или уменьшение длины дульной части ствола на 10 мм приводит лишь к незначительным изменениям (не более 1%) скорости и степени проплавления, вылетающих из ствола частиц. Это свидетельствует об их достаточной инерционности к силовому и тепловому воздействию со

стороны газового потока. Поэтому можно полагать, что параметры частиц на выходе из ствола и вблизи подложки практически совпадают.

Для сопоставления данных численного моделирования с экспериментом по результатам расчетов (с учетом реального разброса частиц по размерам и начальным положениям в стволе) проводилась оценка средней массовой (на единицу массы) скорости \bar{u}_s и средней массовой степени проплавления $\bar{\delta}_s$ частиц на выходе из ствола:

$$\bar{u}_s = \frac{\sum_i (u_s d_s^3)_i}{\sum_i (d_s^3)_i},$$

$$\bar{\delta}_s = \frac{\sum_i (\delta_s d_s^3)_i}{\sum_i (d_s^3)_i}$$

(i — порядковый номер частицы).

При этом полагали, что частицы имеют равномерное распределение как по диаметру d_s , так и по глубине загрузки l_s . Шаг по d_s составлял 1 мкм, по l_s — 1 мм. Результаты оценки \bar{u}_s и $\bar{\delta}_s$ при использовании стволов с камерами сгорания различного диаметра представлены на рис. 5 (сплошные линии).

АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно современной концепции о механизме формирования детонационных покрытий [1], заключающейся в том, что при ударе частицы о подложку происходит их сцепление, температура контактной поверхности должна быть не ниже $0.9T_m$. Для этого частица должна иметь достаточный запас тепловой или кинетической энергии. При использовании газовой детонации скорость метаемых частиц составляет сотни метров в секунду (рис. 5,а) и их основная энергия тепловая. Чтобы обеспечить необходимую температуру, частица перед ударом должна быть расплавлена. В этом случае, как уже отмечалось выше, КИП при формировании покрытий в эксперименте достигает максимального значения.

С этой точки зрения в соответствии с расчетами средней степени проплавления частиц (рис. 5,б) максимальные значения КИП в эксперименте должны достигаться при использовании стволов с камерой сгорания диаметром $D \approx 20$ мм (отношение $d/D \approx 0.8$). Наличие максимума $\bar{\delta}_s$ обусловлено следующими причинами. С одной стороны, при увеличении D

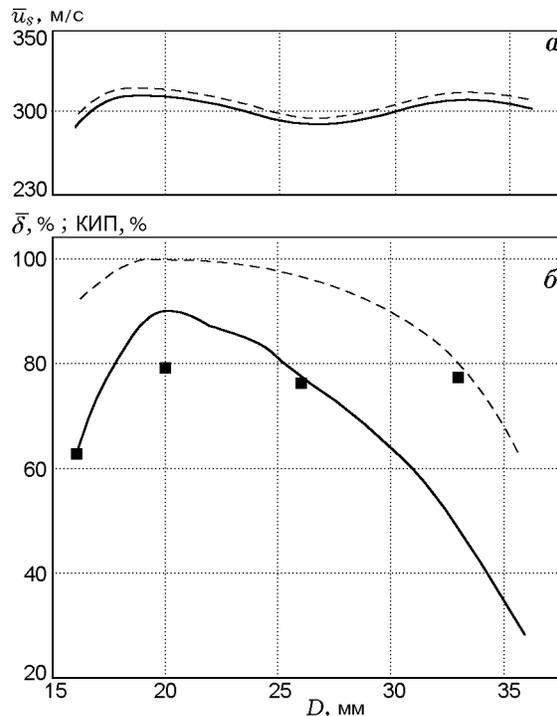


Рис. 5. Средняя массовая скорость частиц (а) и их средняя массовая степень проплавления (б) на вылете из ствола в зависимости от диаметра камеры сгорания D :

сплошная линия — расчет для смеси $C_2H_2 + 7.8O_2$, штриховая — расчет для смеси $C_2H_2 + 7O_2$ (при перемешивании), точки — экспериментальные значения КИП

уменьшаются удельные (на единицу массы) потери энергии ПД на трение и теплоотвод в стенки ствола. С другой стороны, с уменьшением отношения d/D увеличиваются потери энергии ПД за счет интенсификации пульсационных процессов в камере сгорания, возникающих при последовательном отражении газового потока от стенок конически сужающегося патрубка и закрытого торца ствола [12]. Как следует из анализа численного решения, при $D \approx 30$ мм доминирует второй процесс, что приводит к снижению температуры ПД, поступающих из камеры сгорания в дульную часть ствола. В результате интенсивность нагрева частиц в профилированном стволе уменьшается, и при $D > 30$ мм средняя степень их проплавления $\bar{\delta}_s$ становится даже меньше, чем в прямом стволе (см. рис. 5,б).

Результаты измерения КИП при напылении нихромового порошка зарядами смеси $C_2H_2 + 7.8O_2$ при вариации сечения камеры сгорания приведены на рис. 5,б (точки). При

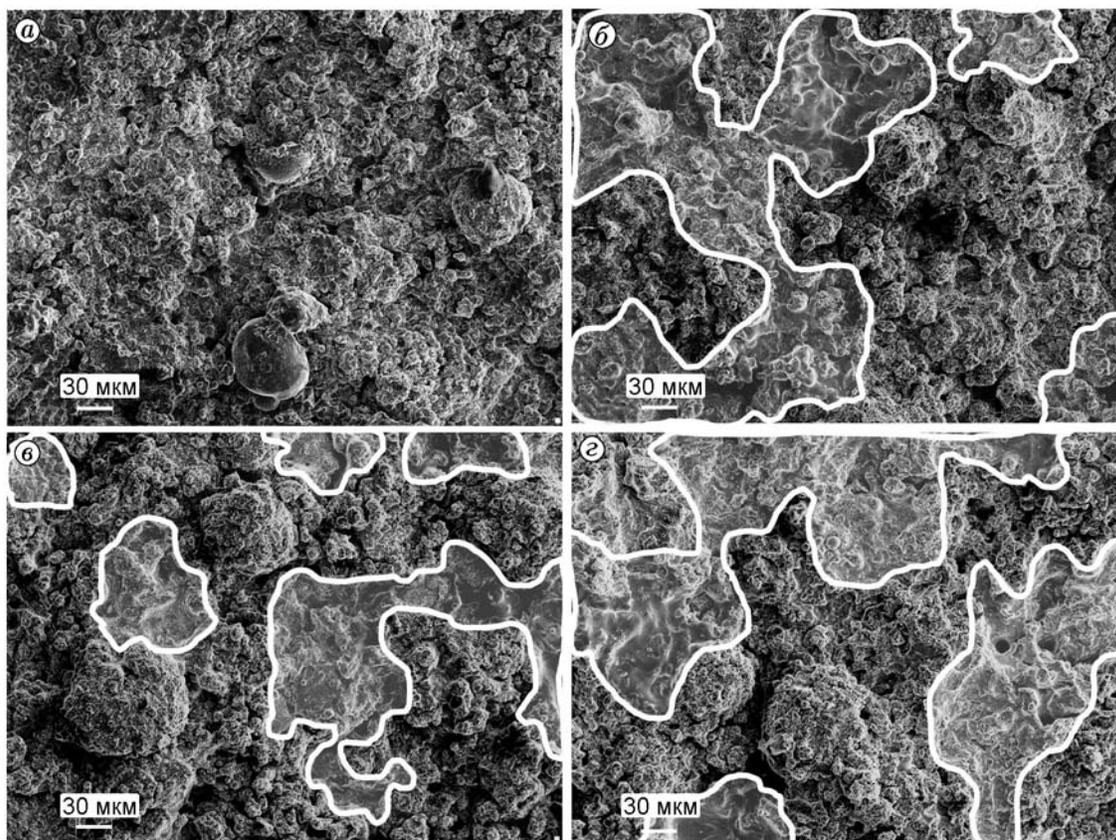


Рис. 6. Морфология поверхности покрытия, нанесенного с использованием профилированных стволов с камерами сгорания различного диаметра:

a — $D = 16$ мм («лужи» отсутствуют), *б* — $D = 20$ мм (зона «луж» $45 \div 50$ %), *в* — $D = 26$ мм (зона «луж» $30 \div 35$ %), *г* — $D = 33$ мм (зона «луж» $40 \div 45$ %)

увеличении диаметра камеры наблюдается явный рост КИП, достигающий максимума при $D = 20$ мм, что согласуется с результатами численного исследования. Однако корреляция между \bar{d}_s и КИП нарушается при использовании камеры диаметром $D = 33$ мм. Для объяснения этого потребовался дополнительный анализ экспериментальных и расчетных данных.

На рис. 6 показаны микрофотографии поверхности покрытий, отображающие их морфологию. Покрытие при использовании прямого ствола (рис. 6, *a*) формируется в основном частично расплавленными частицами («сплэты» как на рис. 3, *б*), которые при падении на рельефную поверхность пескоструйной подложки и в дальнейшем на межслойный рельеф разбиваются на фрагменты, связываемые собственным расплавом без образования заметных объемов расплавленного материала. Наблюдаются даже отдельные непроплавленные

частицы («сплэты» как на рис. 3, *a*). На трех остальных образцах (рис. 6, *б-г*) наблюдаются целые области проплавленного материала — «лужи» (выделены белым контуром), образованные от растекания уже полностью расплавленных частиц («сплэты» как на рис. 3, *в*). Причем «лужи» явно преобладают на покрытии (см. рис. 6, *б*), напыленном с камерой сгорания диаметром 20 мм. Такая картина согласуется с зависимостью КИП (точки на рис. 5, *б*), отображая вариацию энергетического воздействия ПД при трансформации геометрии камеры сгорания.

Таким образом, приведенные экспериментальные данные подтверждают, что при увеличении диаметра камеры сгорания от 26 до 33 мм интенсивность нагрева частиц потоком ПД не снижается. С теоретической точки зрения этот феномен можно объяснить следующим образом.

В эксперименте для стабилизации иници-

ирования детонации взрывчатый газовый заряд в стволе был стратифицирован. Так, камера сгорания примерно на 10 % своего объема (у свечи зажигания) заполнялась высокоактивной смесью $C_2H_2 + 1.07O_2$, а остальная ее часть — основной смесью $C_2H_2 + 7.8O_2$. Можно предположить, что в условиях проточной подачи газов в профилированном стволе при увеличении диаметра камеры сгорания степень перемешивания этих двух смесей будет только возрастать. Это связано с уменьшением длины камеры сгорания, увеличением размытия границы перехода из одной смеси в другую, нарушением квазиодномерности движения газового потока при заполнении ствола. При полном перемешивании в камере сгорания перед «выстрелом» будет находиться взрывчатая смесь $C_2H_2 + 7O_2$, более энергоемкая, чем смесь $C_2H_2 + 7.8O_2$. Соответствующие расчеты средних значений скорости \bar{u}_s и степени проплавления $\bar{\delta}_s$ частиц для смеси $C_2H_2 + 7O_2$ приведены на рис. 5 (штриховые линии). Видно, что перемешивание смесей в камере сгорания практически не влияет на скорость (кинетическую энергию) метаемых частиц (см. рис. 5,а), но при этом существенно возрастает степень их проплавления (см. рис. 5,б). В камере диаметром $D = 33$ мм возможно увеличение $\bar{\delta}_s$ с 49 до 80 %. Доля полностью расплавленных частиц, которые ответственны за образование «луж» в эксперименте (см. рис. 6,з), также возрастает. Именно в результате этого значение КИП не снижается при напылении с использованием профилированного ствола, имеющего камеру сгорания диаметром 33 мм.

ВЫВОДЫ

Впервые проведено исследование процесса газовой детонации с использованием импульсного газодетонационного аппарата, позволяющего формировать с высокой точностью заряд взрывчатой смеси при проточной подаче газовых компонентов, причем не только однородного, но и стратифицированного по длине ствола состава. Эффективность смешения компонентов и точность состава подтверждены экспериментальным измерением параметров газовой детонации.

Предложена оригинальная методика идентификации температуры нагреваемых продуктами детонации твердых частиц по фиксации «сплэтов» в состоянии фазового перехода, что

позволило с высокой достоверностью верифицировать используемую расчетную модель.

Проведенное исследование показало, что профилирование ствола детонационной установки с увеличением сечения камеры сгорания при малых углах конического перехода не только полезно для оптимизации конструкции аппарата, но и положительно влияет на эффективность процесса детонационного напыления. Эксперимент качественно вполне согласуется с результатами численного моделирования, отражая динамику процессов разгона и нагрева порошковых частиц при сокращении длины камеры сгорания до четырех раз с соответствующим увеличением ее сечения при неизменном объеме. Это позволяет сделать вывод, что габариты ствола детонационной установки можно существенно уменьшить за счет сокращения длины камеры сгорания, не ухудшая технологических возможностей аппарата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев Ю. А., Васильев А. А., Ульяницкий В. Ю. Газовая детонация и ее применение в технике и технологиях (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 4. — С. 22–54.
2. Гавриленко Т. П., Николаев Ю. А., Прохоров Е. С., Ульяницкий В. Ю. О механизмах образования покрытий при газотермическом напылении // Физика горения и взрыва. — 1990. — Т. 26, № 2. — С. 110–123.
3. Гавриленко Т. П., Николаев Ю. А., Митрофанов В. В., Васильев А. А., Топчий М. Е. Установка для метания частиц: а. с. 613551 СССР. — 1978.
4. Гавриленко Т. П., Николаев Ю. А., Ульяницкий В. Ю. Использование пересжатой детонации для нанесения покрытий // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 3. — С. 125–133.
5. Ulianitsky V., Shtertser A., Zlobin S., Smurov I. Computer-controlled detonation spraying: from process fundamentals toward advanced applications // J. Therm. Spray Technol. — 2011. — V. 20, iss. 4. — P. 791–801.
6. Ульяницкий В. Ю., Кирякин А. Л., Штерцер А. А., Злобин С. Б. Установка для детонационного напыления покрытий: пат. РФ, RU 2 399 430 от 17.02.2009.
7. Ульяницкий В. Ю., Кирякин А. Л., Штерцер А. А., Злобин С. Б. Установка для детонационного напыления покрытий: пат. РФ, RU 2 399 431 от 17.02.2009.
8. Ульяницкий В. Ю., Кирякин А. Л., Штерцер А. А., Злобин С. Б. Импульсный

- дозатор порошка: пат. РФ, RU 2 400 310 от 17.02.2009.
9. **Smurov I., Pervushin D., Chivel Yu., Laget B., Ulianitsky V., Zlobin S.** Measurements of particles parameters at detonation spraying // CD: ITSC-2010 Proc. Singapore, May 3–5, 2010. — P. 145–149. — <http://dnb.ddb.de>.
 10. **Злобин С. Б., Ульяницкий В. Ю., Штерцер А. А.** Детонационное напыление покрытий из сплавов на никелевой основе и чугуна и исследование их свойств // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2008. — № 11. — С. 36–41.
 11. **Бойко В. М., Григорьев В. В., Ждан С. А., Карнаухов А. А., Папырин А. Н.** Исследование динамики ускорения и нагрева металлических частиц за детонационной волной // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 4. — С. 133–136.
 12. **Прохоров Е. С.** Динамика разгона и нагрева мелкодисперсных частиц пересжатými детонационными волнами // Динамика сплошной среды. — 1984. — Вып. 68. — С. 108–115.
 13. **Карамышева С. А., Прохоров Е. С.** Влияние формы и степени заполнения ствола взрывчатой смесью на параметры разгона частиц в установках детонационного напыления // Вопросы использования детонации в технологических процессах: сб. науч. тр. / Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО АН СССР. — Новосибирск, 1986. — С. 105–118.
-

Поступила в редакцию 10/V 2013 г.