

РАЗГОН И НАГРЕВ ЧАСТИЦ В ПРОФИЛИРОВАННОМ СТВОЛЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДЕТОНАЦИОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

С.Б. Злобин, Е.С. Прохоров, В.Ю. Ульяницкий

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Процессы тепло- и массообмена между частицами порошка и продуктами газовой детонации – одна из центральных задач технологии детонационного напыления. Обычно для разгона и нагрева частиц используются детонационные установки с прямым стволом (открытая с одного конца труба диаметром $15\div 20$ мм и длиной $1\div 2$ м). Энергетика этих процессов (скорость u и температура T частиц на вылете из ствола) в первую очередь определяется размерами области сгорания, точнее, объемом взрывчатого газа V , который поступает в ствол перед выстрелом.

В патенте [1] была обоснована перспективность профилирования ствола детонационной установки для организации процесса напыления с использованием пересжатой газовой детонации. В дальнейшем результаты экспериментов и соответствующих расчетов [2] подтвердили эффективность этой идеи при больших углах (около 30° на сторону) перехода из широкой камеры сгорания в дульную часть аппарата. Однако при практической реализации такого устройства возникла неразрешимая пока проблема паразитного запыления конуса камеры сгорания при длительном процессе напыления, необходимом в промышленных условиях, которая исчезает при малых (менее 15°) углах схождения. И хотя при таких углах эффект пересжатия существенно уменьшается, такое профилирование весьма полезно для оптимизации конструкции установки детонационного напыления, особенно, в связи с интеграцией аппаратов напыления в роботизированные процессы. В связи с этим, данная работа посвящена численному моделированию и экспериментальной реализации процесса воздействия продуктов газовой детонации на порошковые частицы в профилированном канале с малым углом схождения.

Эксперименты проводились на базе разработанного в ИГиЛ СО РАН промышленного компьютеризированного комплекса детонационного напыления CCDS 2000 [3], рабочий орган которого показан на рис.1. Комплекс имеет прецизионную систему газопитания и подачи порошка с компьютерным управлением.



Рис. 1. Рабочий орган комплекса детонационного напыления CCDS2000 .

Заряд взрывчатой смеси в этом аппарате дозируется с точностью не хуже 5%, а порошок (массой ~ 50 мг) подается в ствол радиально и распыляется в стволе с локализацией порядка диаметра ствола. Это позволяет с хорошей точностью верифицировать модельные расчеты.

Управляется аппарат программой, интерфейс «Редактора Циклограмм» которой 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 производится инициирование детонации. По окончании выстрела (разгрузки давления продуктов детонации) производится продувка ствола воздухом или инертным газом. В циклическом режиме процесс повторяется с частотой до 10 Гц.

Программа Spot		Технология konus_st		Ресурс: 30788	
Имена циклограмм: 1->h80x20 2->пустая 3->пустая 4->пустая 5->пустая					
A->автосоствление G->параметры пшки S->сервис K->клавиши					
Клапана	Циклограмма в технологии (номер 1)	Вкл	Выкл		
1-Ствол	125--145	5< 8<11	8<10<13		
2-Топл.1	5-----49	1< 1< 2	1< 2< 3		
3-Топл.2		1< 1< 2	1< 2< 3		
4-Кисл.1	5-----49	1< 1< 2	1< 2< 3		
5-Кисл.2		1< 1< 2	1< 2< 3		
6-Возд.1	103-----194	1< 1< 2	1< 2< 3		
7-Возд.2	103-----194	1< 1< 2	1< 2< 3		
8-Доз. 1	65-----125	15<20<25	15<20<25		
9-Доз. 2		10<15<20	15<20<25		
10-Резерв		1< 1< 2	1< 2< 3		
Искра	135				
1----- Длительность циклограммы -----200		0.К.			
Продувка = 72 %		Заполн. ствола = 60 %		Кислор./топл. = 1.06909	
Температура ствола= 50°C Диаметр ствола= 16 мм Длина ствола= 1000 мм					
Жиклеры ,мм: 2-2.0 3-2.0 4-2.1 5-2.1 6-2.2 7-2.0					
F2->сохранить F5->включить F8->выключить F9->локальное меню ESC->выход					

Рис. 2. Циклограмма компьютерного управления выстрелом.

Для изучения процесса в профилированных каналах был изготовлен набор стволов со специализированной камерой зажигания, адаптированный к рабочему органу ССДС2000. Схема эксперимента приведена на рис. 3. Изучено влияние профилирования камеры сгорания для базового прямого ствола длиной 1 м и диаметром $d = 16$ мм. Дульная часть ствола длиной 300 мм оставалась неизменной, а камера сгорания при сохранении своего объема V трансформировалась с изменением диаметра прямой части D в диапазоне: 16, 20, 26 и 33 мм, и коническим сужением с углом 10° (на сторону). Порошок инжесктировался на переходе из камеры сгорания в дульную часть.

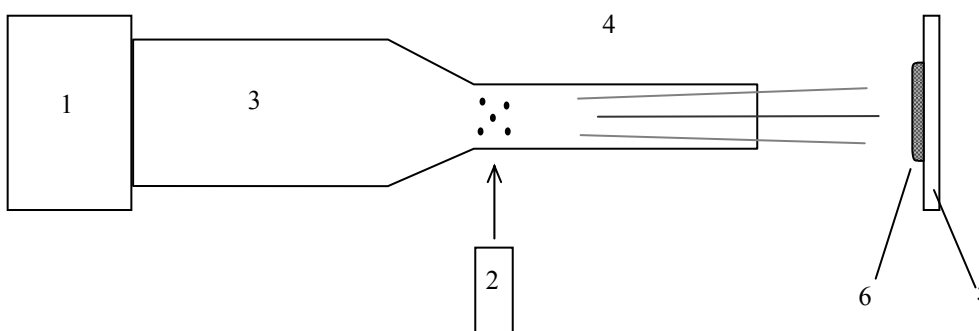


Рис. 3. Схема эксперимента: 1 – система газопитания, 2 – дозатор порошка, 3 – камера сгорания, 4 – дульная часть ствола, 5 – подложка, 6 – покрытие.

Надежных методов измерения температуры порошковых частиц в импульсных процессах типа детонационного напыления пока не существует, поэтому в наших

экспериментах воздействие продуктов детонации на порошок анализировалось косвенными технологическими параметрами процесса напыления. Например, в [4] показано, что коэффициент использования порошка (КИП) при напылении напрямую связан с прогревом порошка, в частности, определенно отражает проплавление частиц максимумом своего значения.

Для экспериментов были отобраны частицы сфероидизированного порошка нихрома узких фракций 40÷45 и 50÷55 мкм. Морфология частиц приведена на рис. 4. Анализ показывает, что около 80 % частиц, отсеянных через сита размером 40 и 45 микрон, имеют правильную сферическую форму. Примерно 10% от общего количества составляют сферические частицы с боковым дефектом (в виде, частицы меньшего размера, соединенной с основной, либо бокового выступа неправильной формы). Около 5% частиц имеют неправильную форму, отличающуюся от сферической. Также около 5% частиц имеют удлиненную форму с отношением максимального и минимального размеров до 2-х раз. Что касается размера частиц, то около 5% частиц имеют размер, выходящий за границы фракции. Так, на рис. 4, размер самой мелкой сферической частицы, отмеченной маркером «P1», составляет 38,5 мкм, а самой крупной, отмеченной маркером «P2» – 50 мкм.

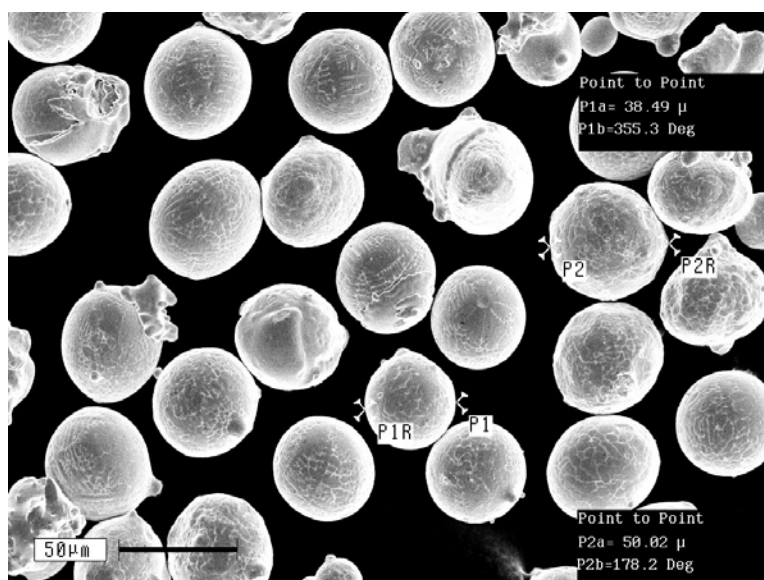


Рис. 4. Внешний вид порошка ПН80Х20 фракции 40÷45 мкм.

Перед проведением натурных испытаний предварительно были выполнены поисковые вычислительные эксперименты, с помощью которых было проанализировано влияние геометрии (отношения диаметров d/D) профилированного ствола на параметры разгона частиц. Численные исследования баллистики порошка внутри ствола детонационной установки переменного сечения реализованы на основе квазиодномерной математической модели, наиболее полно сформулированной в работе [5]. При рассмотрении течения такой двухфазной среды «реагирующий газ – химически инертные частицы» использованы традиционные упрощающие предположения: 1) частицы представляют собой недеформируемые сферы, не слипающиеся и не сталкивающиеся друг с другом; 2) расстояния, на которых существенно изменяются параметры течения, велики по сравнению с размерами частиц; 3) температура внутри частиц одинакова; 4) вязкость и теплопроводность существенны лишь в процессах взаимодействия между фазами; 5) 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 ствола. При этом учитывается возможность частичного заполнения

ствола взрывчатой смесью, когда частицы в зависимости от глубины их загрузки в стволе могут разгоняться потоком ударно-сжатого инертного газа и/или химически реагирующим потоком продуктов детонации.

Анализ численного решения проведен для ацетилено-кислородной смеси, разбавленной азотом ($C_2H_2 + 1.05 O_2 + 0.5 N_2$). Расчеты выполнены для единичных частиц нихрома, состоящих из 80 % (по массе) никеля Ni и 20 % хрома Cr. Диаметр частиц варьировался от 40 до 50 мкм. Глубина их загрузки составляла 300 мм, если ее отсчитывать от среза ствола.

Согласно современной концепции о механизме формирования детонационных покрытий [6], чтобы при ударе частицы о подложку произошло их сцепление, температура контактной поверхности должна быть не ниже 0,9 температуры плавления материала частицы. Для этого частица должна иметь достаточный запас тепловой или кинетической энергии. При использовании детонации Чепмена-Жуге скорость метаемых частиц составляет сотни метров в секунду и их основная энергия тепловая. Чтобы обеспечить необходимую температуру, частица перед ударом должна быть расплавлена или хотя бы иметь температуру близкую к температуре плавления материала частицы $T_{пл}$. Исходя из этого, и был подобран исходный состав взрывчатой смеси (варьировалось ее разбавления азотом), обеспечивающий требования к температуре частиц на вылете из прямого ствола ($d/D = 1$).

Основная цель проведенных вычислительных экспериментов – определить для профилированного ствола критическое значение для отношения диаметров дульной части и камеры сгорания, ниже которого скорость и температуры частиц на вылете из ствола значительно отличаются от случая при $d/D = 1$. Соответствующие результаты расчетов представлены на рис. 5.

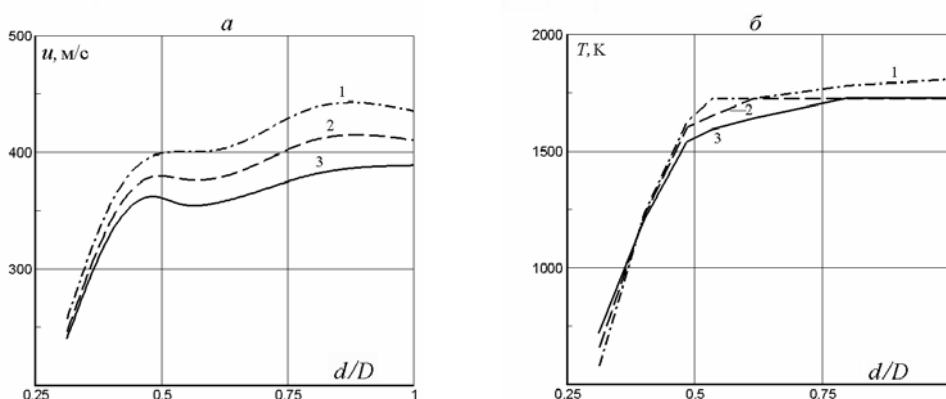


Рис. 5. Скорость (а) и температура (б) частиц на вылете из профилированного ствола в зависимости от отношения диаметров его дульной части и камеры сгорания:
1 – частицы диаметром 40 мкм; 2 – 45 мкм; 3 – 50 мкм.

Горизонтальные участки кривых 1–3 на рис. 5, б соответствуют температуре плавления $T_{пл}$. Видно, что при увеличении диаметра камеры сгорания температура частиц на вылете из ствола с начала медленно понижается вплоть до значений $d/D = 0,5$, а затем резко падает. Это может означать ухудшение качества детонационного покрытия с использованием профилированных стволов, у которых $d/D < 0,5$.

На рис. 6 приведены фотографии морфологии поверхности покрытия ПН80Х20 размером $40 \div 45$ мкм, нанесённого с использованием профилированных стволов с различными диаметрами камеры сгорания. Ранее проведенные исследования [7] показали, что покрытие может формироваться не только из полностью расплавленных, но и из непроплавленных пластифицированных частиц. При этом закрепившиеся на подложке частицы, с температурой до столкновения порядка $0,9 T_{пл}$, имеют куполообразную форму. При увеличении температуры до $T_{пл}$, частицы интенсивнее деформируются, а расплавленная часть материала растекается по подложке. При превышении температуры плавления, частица

имеет форму очень тонкого диска с характерным металлическим блеском. При этом часть материала разбрызгивается в стороны и не образует покрытие, причем, чем выше температура, тем больше потери материала. Исходя из этих представлений, можно судить о состоянии напыляемых частиц по виду покрытия.

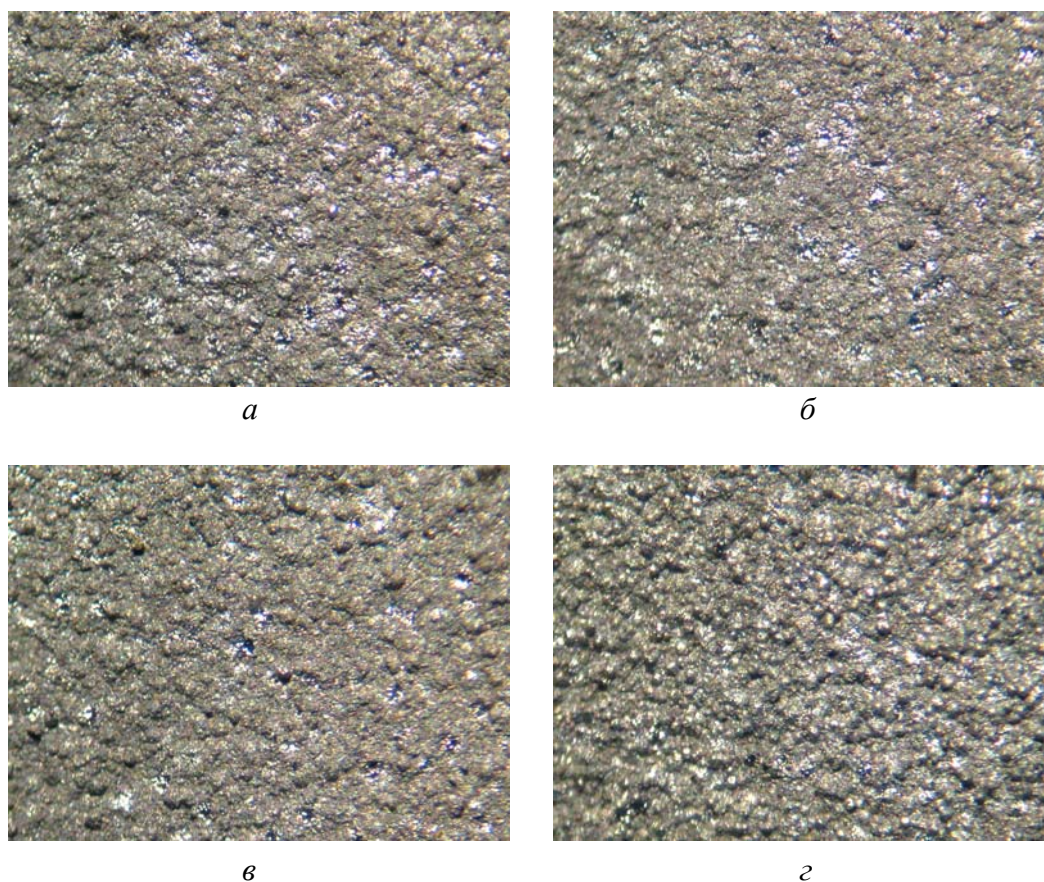


Рис. 6. Морфология поверхности покрытия ПН80Х20 размером 40-45 микрон, нанесённого с использованием профилированных стволов с различными диаметрами камеры сгорания.
а) $\varnothing 16$ мм ($d/D = 1$), б) $\varnothing 20$ мм ($d/D = 0,8$), в) $\varnothing 26$ мм ($d/D = 0,62$), г) $\varnothing 33$ мм ($d/D = 0,48$).

Так, по внешнему виду, наиболее близки покрытия в вариантах при $d/D = 1$ (рис. 6,а) и при $d/D = 0,62$ (рис. 6,в). Блестящих участков в последнем варианте меньше, что говорит о меньшей проплавленности частиц. Этот факт согласуется с расчетами температуры частиц (рис. 5,б). Наименьшую высоту рельефа имеет поверхность покрытия в варианте $d/D = 0,8$ (рис. 6,б). Обычно это наблюдается при увеличении температуры или скорости напыляемых частиц, но в пользу второго варианта выступает наличие расчетного максимума скорости частиц размером от 40 до 45 мкм при $d/D = 0,85$ (см. рис. 5,а). Предсказанное падение температуры и скорости частиц находит подтверждение в появлении большого числа нерасплавленных частиц в покрытии при $d/D = 0,48$ (рис. 6,г). В этом варианте покрытие имеет самую рельефную поверхность, свидетельствующую о наименьшей скорости частиц.

Результаты измерений КИП в диапазоне, соответствующем выполненным расчетам, представлены на рис. 7. Видно, что по сравнению с прямым стволом ($d/D = 1$), масса покрытия при использовании профилированного ствола не снижается вплоть до отношения $d/D = 0,62$. Этот факт согласуется с анализом морфологии поверхности покрытий. Более того, для обеих использованных фракций порошка при $d/D \sim 0,8$ наблюдается максимум КИП, достигающий значения $66 \div 69$ % для использованных порошков. Снижение эффективности напыления в области $d/D < 0,6$ согласуется как с расчетами скорости и температуры частиц, так и с внешним видом покрытий.

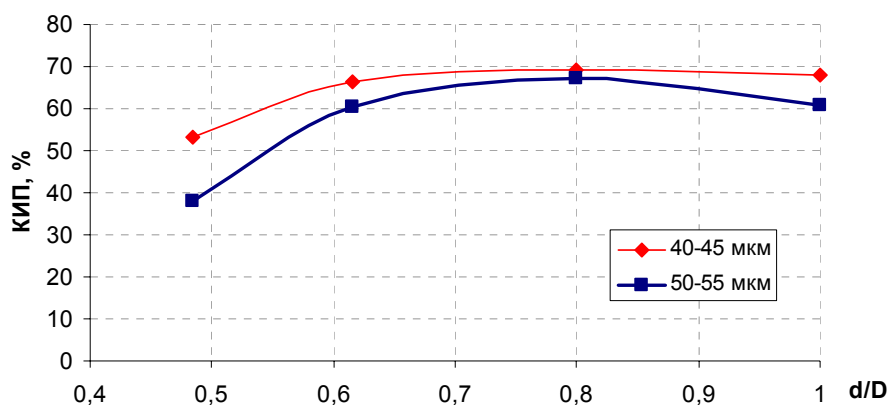


Рис. 7. Зависимость коэффициента использования порошка от отношения диаметров дульной части ствола d и камеры сгорания D .

Таким образом, не считая отклонения (на 5-10 %) в большую сторону для ствола с 20 мм камерой сгорания, эксперимент качественно вполне согласуется с расчетом, отражая появление дефицита нагрева порошка при сокращении длины камеры сгорания до четырех раз с соответствующим увеличением ее сечения при неизменном объеме. Это позволяет сделать главный вывод проведенного исследования, что габариты ствола детонационной установки можно существенно уменьшить за счет сокращения длины камеры сгорания, не ухудшая технологических возможностей аппарата.

Работа выполнена при частичном финансировании за счет средств грантов РФФИ (проект № 11-01-00634а), программы фундаментальных исследований Президиума РАН (проекты № 26.2 и № 25.8), программы РАН № 25 и ведущей научной школы (НШ-247.2012.1).

Литература

1. Гавриленко Т.П., Николаев Ю.А., Митрофанов В.В., Васильев А.А., Топчийн М.Е. Установка для метания частиц // А. с. СССР № 613551. 1978.
2. 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.
3. Ulianitsky V., Shtertser A., Zlobin S. and Smurov I. Computer-controlled detonation spraying: from process fundamentals toward advanced applications // Journal of Thermal Spray Technology. 2011. Vol. 20, Issue 4. P. 791-801.
4. 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.
5. 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. / Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО АН СССР, Новосибирск, 1986. С. 105-118.
6. 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, № 11. С. 22-59.
7. Smurov I., Ulianitsky V., Shtertser A., Zlobin S. High-velocity Collision of Hot Particles with a Solid Substrate under a Detonation Spraying – Detonation Splats// ITSC-2009 Proceedings. USA, Las Vegas. May 2-4, 2009. P. 728-734.