

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРЕСЖАТОЙ ДЕТОНАЦИИ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Т. П. Гавриленко, Ю. А. Николаев, В. Ю. Ульяницкий

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, nikolaev_@academ.org

Использование пересжатых детонационных волн позволяет производить покрытия из порошковых материалов с высокой температурой плавления, а также улучшить качество покрытий из менее тугоплавких материалов. Кинетическая и тепловая энергия фронтов детонации за фронтом пересжатых детонационных волн значительно выше, чем за фронтом самоподдерживающихся детонационных волн Чепмена — Жуге, обычно используемых для напыления. Это открывает перспективы для проектирования микропушек для нанесения покрытий, в том числе и на внутренние поверхности деталей.

Ключевые слова: газовая детонация, пересжатая детонация, нанесение покрытий.

В результате более чем 20-летних исследований процесса детонационного напыления в Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева были разработаны научные основы технологии и создан компьютерно-управляемый детонационный комплекс «Обь». Высокая эффективность разработанного оборудования и технологий была подтверждена практикой промышленного использования как в России, так и за рубежом. Для технологов, разрабатывающих новые режимы напыления и технологии, создана компьютерная программа, позволяющая за очень короткое время рассчитать процесс разогрева и разгона частиц в стволе детонационной установки и прогнозировать адгезию и когезию покрытия. Идея использования пересжатой детонации для расширения возможностей детонационного напыления получила пока только опытную, но уже практическую реализацию. В данной работе приведено сравнение способов нанесения покрытий пересжатой детонацией и детонацией Чепмена — Жуге (ЧЖ).

Основным преимуществом газодетонационного способа напыления является получение покрытий из широкого ассортимента порошковых материалов (металлов, сплавов, карбидов, оксидов и др.), отсутствие пористости (менее 1 %) в покрытиях и значительно более высокая адгезия и когезия по сравнению с покрытиями, полученными другими способами.

Давление за фронтом детонационной волны составляет десятки атмосфер, а температура — несколько тысяч градусов, что позволяет разогнать частицы порошка до скорости в

несколько сотен метров в секунду и разогреть их до температуры плавления. Импульсный характер процесса напыления исключает проблемы охлаждения ствола установки, а также не вызывает заметного нагрева детали, ее поводок и коробления.

Согласно нашим исследованиям [1] во всех термических способах напыления формирование покрытий определяется диффузионными процессами, основную роль в которых играют скорость и температура частиц, взаимно дополняющие друг друга.

Детонационное покрытие формируется элементарными актами взаимодействия расплавленной частицы с холодной поверхностью подложки. В этом случае адгезия и когезия зависят от относительной площади контактной поверхности, на которой имела место взаимодиффузия на глубину нескольких межатомных расстояний за время остывания частицы на поверхности подложки («термический» механизм формирования покрытия).

Поверхность подложки должна быть шероховатой. Для этого поверхность предварительно подвергают пескоструйной обработке, а дальше шероховатость поддерживается автоматически за счет дискретной структуры порошкового покрытия.

При ударе о подложку жидкая частица, движущаяся со скоростью (в зависимости от диаметра) более 100 м/с, растекается по поверхности подложки, формирует кумулятивную струю, которая очищает поверхность подложки и обеспечивает хороший контакт (на молекулярном уровне) между частицей и подлож-

кой. В основании кумулятивной струи находится зона высокого давления. Если это давление превосходит прочность подложки, то последняя пластически деформируется.

В зоне пластической деформации коэффициент диффузии увеличивается на несколько порядков и критическая температура контактной поверхности, необходимая для образования сцепления частиц порошка с подложкой, понижается до $2/3$ температуры плавления. Для достижения такой температуры контактной поверхности тепловой запас частицы может быть значительно меньше. Для металлов достаточно, чтобы частица была лишь частично расплавлена. Тогда средняя прочность адгезии зависит от доли деформированной поверхности подложки, а она, в свою очередь, зависит от скорости частиц и предела текучести материала подложки. Данный «динамический» и упомянутый выше чисто «термический» механизмы образования покрытия дополняют друг друга.

Выступы шероховатостей на поверхности подложки находятся в «привилегированных» условиях, поскольку они более полно окружены горячей частицей и потому более нагреты. Как правило, поверхность подложки остается в твердом состоянии.

Коэффициент диффузии экспоненциально увеличивается с температурой и возрастает на несколько порядков при пластической деформации. Для образования адгезии необходимо, чтобы температура частицы составляла 0.9 температуры плавления при «термическом» механизме формирования покрытия, а при пластической деформации («динамическом» механизме) — 0.67 .

Температура контактной поверхности зависит от энергии частицы, которая является суммой тепловой и кинетической энергии. Результаты работы [1] хорошо согласуются с экспериментом и представлены простыми для применения формулами [2]. Для получения покрытий можно использовать различные комбинации температуры и скорости частицы.

В другом способе нанесения покрытий, так называемом «холодном» напылении, частицы нагреты менее чем на 300 °С, но их скорости высоки — около $1000 \div 1500$ м/с. «Холодный» способ позволяет получать покрытия из легкоплавких материалов. В отличие от «холодного» способа, при плазменном напылении частицы имеют относительно низкие скорости, но

высокие температуры. Дефицит скорости ведет к формированию пористости в покрытии.

Перегрев частиц вреден при любом способе нанесения покрытий. Сильно перегретые частицы могут испаряться, а полностью расплавленные частицы не только дробятся при разгоне их продуктами детонации, но и могут разбрызгиваться при ударе о подложку или широко растекаться по ее поверхности.

Общеизвестно, что детонационная волна представляет комплекс ударной волны и следующей за ней зоны горения. Если длина этой зоны мала по сравнению с длиной и диаметром ствола, используется квазиравновесная математическая модель для расчета параметров продуктов детонации [3].

Для существования самоподдерживающейся детонации ЧЖ необходимо, чтобы скорость детонации была равна сумме скорости газа и скорости звука. Детонация ЧЖ распространяется во взрывчатой смеси неограниченно долго, поскольку волна разрежения не может догнать детонационный фронт [4].

Пересжатая детонационная волна имеет более высокие скорость и давление. Она может быть сформирована только с использованием внешнего источника энергии. Роль такого источника может играть газовый поршень.

Степень пересжатия (α) есть отношение скорости D пересжатой детонационной волны к скорости D_0 детонации ЧЖ [5, 6]. Типичные зависимости параметров газа за фронтом пере-

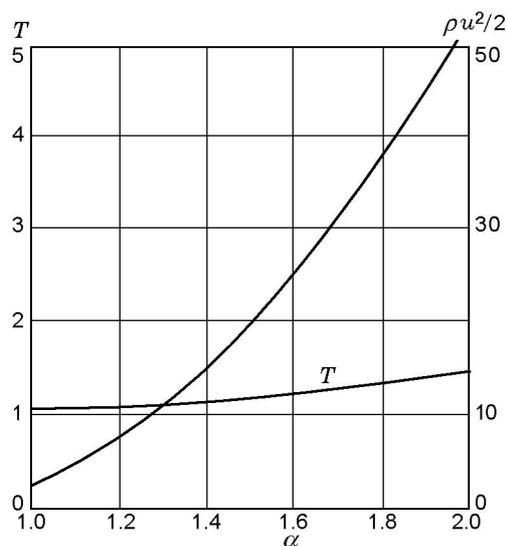


Рис. 1. Температура и динамический напор газа за фронтом пересжатой детонации

сжатой волны от степени пересжатия показаны на рис. 1, где T — температура, $\rho u^2/2$ — динамический напор. Значения этих параметров отнесены к соответствующим параметрам детонации ЧЖ.

Если принимать в расчет скорость химической реакции, то за фронтом детонации появится зона индукции. Это обусловлено задержкой воспламенения взрывчатой смеси. В реальной волне зона индукции всегда нестабильна. В этой зоне происходят микровзрывы, которые вызывают появление и распространение поперечных ударных волн. Столкновение поперечных волн приводит к возникновению новых микровзрывов, таким образом, формируется регулярная пульсирующая структура фронта детонации. Типичный размер этих пульсаций называется размером ячейки.

Размер ячейки является основной характеристикой взрывчатой смеси и сильно зависит от степени пересжатия, поэтому измерение размера ячейки по фоторазверткам или по следовым отпечаткам на закопченной стенке позволяет с достаточной точностью оценить степень пересжатия детонационной волны. Типичная зависимость размера ячейки от степени пересжатия показана на рис. 2 (b — размер ячейки пересжатой детонации, b_0 — детонации ЧЖ, начальное давление смесей $0.1 \div 0.4$ атм).

В экспериментах пересжатая детонационная волна может быть создана путем распространения детонации ЧЖ по взрывчатой смеси переменного состава (например, во взрывчатой

той смеси увеличивается содержание окислителя в направлении распространения детонации ЧЖ) или при распространении детонации ЧЖ в сужающихся каналах, а также при комбинировании этих двух способов. Заполнение сужающейся части канала разбавленной смесью позволяет получить пересжатую детонационную волну, которая увеличивает скорость частиц и увеличивает (или уменьшает) их температуру.

При использовании пересжатой детонации дистанция, на которой частицы приобретают необходимые для формирования покрытия скорость и температуру, уменьшается до нескольких миллиметров. В принципе скорость, давление и соответствующая длина затухания пересжатой детонации могут быть любыми, но реально все эти параметры зависят также от размера ячейки. Максимальное пересжатие в сильно разбавленных смесях можно получить только в случае, когда диаметр узкой части канала примерно равен размеру ячейки в детонации ЧЖ. В этом предельном случае узкая часть канала заполняется инертным газом.

Для получения максимальной скорости и температуры частиц их необходимо ввести в начало узкой части канала. Разработанный для установки детонационного напыления «Обь» [7] дозатор позволяет делать это с точностью до сантиметра.

Ограничением для газодетонационного способа напыления является дробление расплавленных частиц порошка газовым потоком. Это происходит в том случае, когда динамический напор превышает силу поверхностного натяжения расплавленной частицы. По порядку величины динамический напор составляет десятки атмосфер, а сила поверхностного натяжения — одну атмосферу. Раздробленные частицы очень быстро перегреваются в потоке продуктов детонации и даже испаряются. Чтобы избежать этого, необходимо выбирать подходящие условия для напыления.

Следует заметить, что поток газа за фронтом детонации ЧЖ почти не нагревает и почти не ускоряет частицы порошка. Принципиально, детонация ЧЖ используется лишь для быстрого сжигания взрывчатой смеси в стволе. При использовании детонации ЧЖ скорость напыляемых частиц составляет сотни метров в секунду и их основная энергия — тепловая. Чтобы обеспечить необходимую температуру контактной поверхности, частица перед уда-

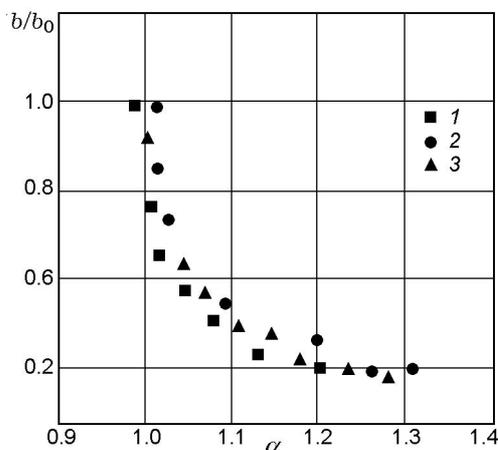


Рис. 2. Зависимость размера ячейки от степени пересжатия:

1 — смесь $C_2H_2 + 1.1O_2$, 2 — $C_2H_2 + 2.5O_2$, 3 — $C_2H_2 + O_2 + 3N_2$

ром о подложку должна быть расплавлена и сильно перегрета (иногда вплоть до температуры кипения). Степень перегрева может быть значительно ниже для композитных материалов, таких, например, как карбид вольфрама, плакированный кобальтом. В них значительный запас энергии содержится в теплоте плавления тугоплавкого компонента. При достаточном прогреве частицы из однородного материала прочность адгезии и когезии сравнима с прочностью материала частицы и не зависит от твердости подложки.

Перешагнутая детонационная волна позволяет нагревать и разгонять частицы порошка потоком газа, непосредственно примыкающим к фронту детонации, и поэтому покрытие формируется из частиц порошка, находящихся в твердом состоянии. Твердые частицы не дробятся в газовом потоке, а дефицит тепловой энергии может быть скомпенсирован кинетической энергией частиц при ударе о подложку.

Длина обычно используемых стволов в установках детонационного напыления ограничена потерями энергии газа в стенки ствола. Эти потери составляют $60 \div 70$ % энергии газа, заключенного в стволе, длина которого равна $50 \div 100$ его диаметрам. Поэтому для напыления тугоплавких материалов стволы диаметром менее 15 мм в установках, работающих в режиме детонации ЧЖ, не применяются.

При использовании перешагнутых детонационных волн из-за короткого времени разогрева и разгона частиц проблема потерь энергии в стенки ствола исчезает, что позволяет уменьшить выходные диаметры стволов.

Математическое моделирование процессов в стволе установки с привлечением различных моделей кинетики, позволяющее достаточно точно рассчитывать разгон, нагрев и дробление частиц порошка при постоянном по длине ствола исходном составе взрывчатой смеси, проведено в работах [8–11]. Но даже в наиболее развитой модели [12] при переменном начальном составе взрывчатой смеси точность была недостаточной из-за вынужденного принятия некоторых кинетических констант не зависящими от состава смеси, что связано с решением задачи в эйлеровых координатах.

В используемой для расчета модели эти недостатки устранены путем введения лагранжевых координат. Дополнительно были точно поставлены граничные условия на открытом конце ствола, которые раньше основыва-

лись на эмпирических данных. Кроме того, в модели вычисляется конечный результат напыления — прочность связи покрытия с подложкой [1].

Математическая постановка задачи подобна приведенной в работе [10] с тем отличием, что ствол вдоль оси заполняется неоднородной по составу взрывчатой газовой смесью и его диаметр уменьшается в направлении распространения детонационной волны. Модель подробно описана в работе [13] и представлена в виде программы.

Программа расчета оформлена в доступном для применения виде и позволяет в интерактивном режиме рассчитывать режимы напыления и разрабатывать технологии нанесения покрытий из широкого ассортимента порошковых материалов на подложки из разных материалов.

Компьютерная программа за время порядка одной минуты может рассчитать процесс в стволе и прогнозировать прочность адгезии и когезии. Результаты расчета представляются в виде таблиц и графиков.

Программа снабжена пополняемым банком теплофизических свойств газов и материалов подложек и порошков, учитывает параметры заполнения ствола, его размеры и шероховатость стенок, место ввода, размер и химический состав частиц порошка, объем смеси, прочность и геометрические характеристики шероховатости подложки. Программа основана на квазиодномерной модели движения квазиравновесных продуктов детонации и обладает точностью, характеризующей ее как численный эксперимент.

Математическая постановка задачи тесно связана с конструкцией установки «Обь» [7]. Ствол с переменным сечением и одним открытым концом заполнен взрывчатой смесью переменного состава. Смесью может содержать углеводороды, водород, кислород, азот, аргон и воздух, причем количество кислорода в смеси достаточно, чтобы избежать образования сажи в заметных концентрациях в продуктах детонации. Иницирование детонации производится у закрытого конца ствола.

В стволе переменного сечения, заполняемого переменной по составу взрывчатой газовой смесью, решалась задача о разгоне и разогреве частиц порошка в канальном приближении [2].

Частицы могут состоять из одного или

двух веществ. В последнем случае предполагается, что одинаковые фрагменты более тугоплавкого вещества вплавлены в более легкоплавкое вещество-связку.

Теплоемкости ингредиентов частицы в твердом состоянии полагаются линейными функциями температуры, а в расплавленном состоянии — постоянными. Энтальпия частиц является суммой интеграла теплоемкости по температуре и теплот плавления ингредиентов частицы, умноженных на степень их расплавленности. Учитывалось и испарение частиц, приводящее к уменьшению их размера и изменению состояния.

Если хотя бы один из ингредиентов частицы расплавлен и гидродинамические силы $d_p \rho (u - u_p)^2$ (где d_p , u_p — диаметр и скорость частицы, ρ , u — плотность и скорость газа) превышают силы поверхностного натяжения σ , т. е. когда число Вебера

$$We = d_p \rho (u - u_p)^2 / \sigma > 2\pi \quad [14-16],$$

то частица распадается на несколько одинаковых частей. В модели [2] предполагается, что распад частицы происходит посредством последовательного деления пополам до тех пор, пока число Вебера не станет меньше критического. Дробление ограничивается размером тугоплавкого нерасплавленного фрагмента.

После вылета из ствола частицы находятся в слабо расширяющейся струе продуктов сгорания и, согласно экспериментальным данным [11], их термодинамические параметры (при расстоянии до мишени порядка 100 мм) могут изменяться до 10 % в ту или другую сторону. Для оценки влияния этого изменения задаваемая в расчете длина последней секции ствола увеличивалась на величину, равную расстоянию от среза ствола до мишени.

В изложенной в [2] модели дифференциальные уравнения проинтегрированы, задача сведена к системе алгебраических уравнений со спецфункциями. Спецфункциям дано приближенное представление в элементарных функциях, конечный результат записан в виде рекуррентных алгебраических формул, которые совместно с известными параметрами частицы перед ударом образуют легко решаемую численно систему алгебраических уравнений.

Для оценки адгезии — прочности сцепления покрытия с подложкой — использовалась единственная на сегодняшний день модель [1]. Результаты расчетов по этой модели находят-

ся в очень хорошем соответствии с данными тщательно выверенных экспериментов [9, 11] и обладают избыточной точностью для практических условий, когда исходные для расчета данные известны лишь приближенно.

Высокая точность результатов рассматривается в интерпретации вариации температуры частиц, эквивалентной погрешности математических расчетов, а она мала вследствие сильной экспоненциальной зависимости коэффициента диффузии от температуры.

В модели [2], основанной на концепции диффузионной связи, предполагается, что для 100 %-й прочности сцепления двух материалов достаточно взаимодиффузии на глубину $3 \div 10$ межатомных расстояний. Средняя прочность адгезии равна произведению прочности наиболее слабого материала и относительной доли поверхности, где подобная связь образовалась.

Для определения глубины диффузии в модели [2] решена нестационарная термодиффузионная задача, учитывающая остывание, многофронтную кристаллизацию частицы сложного состава и шероховатость контактной поверхности. Из-за шероховатости прогрев подложки на выступах и впадинах при ударе нагретой частицы о подложку существенно различается. В модели также учтены: различные термодинамические свойства ингредиентов частицы как в твердом, так и в жидком состоянии и сильная зависимость коэффициента диффузии в твердом состоянии материалов от температуры и пластической деформации.

Относительная площадь контактной поверхности ω_{din} , где диффузионная связь образуется благодаря деформации подложки, может быть вычислена по формуле

$$\omega_{din} = \begin{cases} 0, & T_c < 0.67T_{melt,0}, \\ 1 - (1 + \rho_p u_p^2 / 2\sigma_Y)^{-0.5}, & T_c \geq 0.67T_{melt,0} \end{cases}$$

где σ_Y — предел текучести подложки, индекс p относится к параметрам частицы; T_c , T_0 , $T_{melt,0}$ — температура контакта, начальная температура и температура плавления легкоплавкого ингредиента подложки соответственно.

При известных значениях T_c и угла φ при вершинах шероховатости подложки относительная доля контактной поверхности ω_T , на которой за время остывания частицы успевает образоваться диффузионная связь даже при

отсутствии деформации подложки (при «термическом» механизме образования покрытия), определяется по формуле

$$\omega_T = \begin{cases} 0, & K \geq K_*, \\ (K_* - K)/2(K_* - 1), & 1 < K < K_*, \\ 1, & K \leq 1, \end{cases}$$

где $K = (0.9T_{melt,0} - T_0)/(T_c - T_0)$, $K_* = 2 - \varphi/\pi$. Отметим, что ω_T терпит разрыв при $K = 1$, что, в свою очередь, полностью подтверждается экспериментальными данными.

Полная относительная площадь контактной поверхности ω , где образуется диффузионная связь частицы с подложкой, равна максимальной из величин ω_T и ω_{din} . Тогда прочность адгезии $\sigma_{adh} = \omega\sigma_{ult}$, где σ_{ult} — прочность слабейшего из материалов частицы и подложки.

Прочность когезии определяется аналогично, только материал подложки заменяется на материал частицы. Учитывая, что при пескоструйной обработке шероховатость поверхности подложки острее шероховатости покрытия, при расчете адгезии принято $\varphi = \pi/2$, а когезии — $\varphi = 2\pi/3$.

Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментами на установке детонационного напыления «Обь», в которой для производства покрытий используется детонационная волна ЧЖ.

Эксперименты с использованием пересжа-

тых волн для нанесения покрытий из композитного порошка ВК-25 (75 % WC + 25 % Co) проведены на опытной лабораторной установке с диаметром ствола на выходе 10 мм. Полученные результаты также хорошо совпадают с расчетами, хотя пока количество этих данных немногочисленно.

Для сравнения были выполнены расчеты, в которых для напыления используется как детонация ЧЖ, так и пересжатая детонация, причем оба этих процесса дают примерно одинаковую величину адгезии (500 МПа) для порошка ВК-25 (рис. 3).

На рис. 3 приведена схема ствола детонационной пушки при использовании детонации ЧЖ. Весь ствол заполнен ацетиленокислородной смесью, разбавленной азотом при начальном давлении 1 атм. В стволе на расстоянии 400 мм от открытого конца располагались различающиеся диаметром частицы порошка.

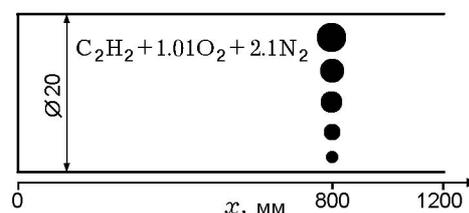


Рис. 3. Схема ствола при расчете для случая детонации ЧЖ

Таблица 1

Результаты расчета для детонации Чепмена — Жуге

Параметры	Вариант расчета				
	1	2	3	4	5
Исходные данные					
Материал 1 (Co), %	25	25	25	25	25
Материал 2 (WC), %	75	75	75	75	75
Диаметр, мкм	40	30	20	15	10
Фрагменты, мкм	10	10	10	10	10
Позиция, мм	400	400	400	400	400
Результаты расчета					
Температура, К	2 080.15	2 274.4	2 391.01	2 409.63	2 410.17
Скорость, м/с	309.159	372.354	441.362	488.355	554.701
Диаметр, мкм	40	30	20	15	10
Адгезия, МПа	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0
Когезия, МПа	295.4	358.9	500.0	500.0	500.0

Размеры, материал и начальное положение в стволе для каждой частицы приведены в исходных данных в табл. 1.

Расчитанные параметры частиц на срезе ствола, а также адгезия и когезия покрытий приведены в результатах расчета в табл. 1.

На рис. 4 показана схема ствола детонационной установки, в которой для формирования покрытий используется пересжатая детонационная волна.

Часть, ограниченная справа двумя штриховыми линиями, заполнена эквимолярной смесью ацетилена и кислорода. Остальная часть ствола заполнена азотом. На границе между этими смесями происходит их перемешивание, объем зоны перемешивания не превышает 5 % объема всего ствола. В начале узкой части ствола, длина которой до открытого конца ствола составляет 30 мм, расположены частицы такого же размера, как и на

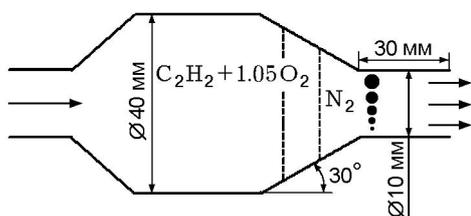


Рис. 4. Схема ствола при расчете для случая пересжатой детонации

рис. 3. Длина узкой части ствола выбрана по результатам экспериментов, в которых установлено, что пересжатие сохраняется на расстоянии, примерно равном 3 диаметрам узкого ствола, а дальше быстро спадает [6]. Начальные данные для частиц и результаты расчета приведены в табл. 2.

Сравнение результатов расчета, приведенных в табл. 1 и 2, показывает, что в обоих случаях:

- 1) адгезия и когезия покрытий одинаковы;
- 2) все частицы сохранили свой первоначальный размер (не раздробились в процессе ускорения и нагрева);
- 3) сумма кинетической и тепловой энергии частиц практически одинакова, что обеспечивает одинаковую адгезию и когезию в соответствии с представлениями, развитыми в работе [1];
- 4) в пересжатой волне частицы приобретают эту энергию, стартуя с дистанции 30 мм, а в волне ЧЖ — с 400 мм.

Кроме того, необходимо также отметить, что при использовании детонации ЧЖ температура частиц выше, а скорость ниже по сравнению со случаем пересжатых волн. Более низкая температура обеспечивает более высокий фактор сохранения частиц от разбрызгивания при их ударе о подложку.

Экспериментально установлено, что при использовании детонации ЧЖ и ствола диа-

Таблица 2

Результаты расчета для пересжатой детонации

Параметры	Вариант расчета				
	1	2	3	4	5
Исходные данные					
Материал 1 (Co), %	25	25	25	25	25
Материал 2 (WC), %	75	75	75	75	75
Диаметр, мкм	40	30	20	15	10
Фрагменты, мкм	10	10	10	10	10
Позиция, мм	30	30	30	30	30
Результаты расчета					
Температура, К	1083.65	1279.13	1596.01	1767.0	2125.94
Скорость, м/с	996.274	1132.57	1324.55	1459.78	1654.62
Диаметр, мкм	40	30	20	15	10
Адгезия, МПа	494.1	500.0	500.0	500.0	500.0
Когезия, МПа	426.2	500.0	500.0	500.0	500.0

метром 10 мм получить покрытие из композитных порошков ВК-25 не удастся из-за теплопотерь в стенке ствола. Используя приведенную в [2] программу, было проведено численное моделирование процесса напыления порошка ВК-25 детонацией ЧЖ в стволе диаметром 10 мм. В расчетах варьировались длина ствола (от 800 до 1800 мм), состав ацетиленокислородной смеси, степень разбавления смеси азотом и воздухом, степень заполнения ствола, слоистое заполнение ствола взрывчатой смесью различного состава, шероховатость стенок ствола, место ввода в ствол частиц порошка размером 60, 40, 30, 20 и 10 мкм.

Анализ расчетов показывает, что только в отдельных вариантах образуются покрытия для частиц размером 20 и 10 мкм. Частицы диаметром 60, 40 и 30 мкм ни в каких вариантах не образуют покрытия при использовании детонации ЧЖ.

Результаты расчетов хорошо согласуются с установленными фактами, хотя в экспериментах выделить узкую фракцию порошка для ввода в ствол проблематично. Попутно заметим, что варьирование этих параметров в эксперименте реально невозможно из-за громадного времени, необходимого для проведения экспериментов, и больших материальных и трудовых затрат.

При использовании пересжатой детонации можно значительно увеличить температуру и скорость частиц путем варьирования состава взрывчатой смеси и степени заполнения ствола. Это открывает возможность получать покрытия из порошковых материалов с высокой температурой плавления, того же ВК-25, используя стволы с диаметром на выходе менее 10 мм. В табл. 3 представлены результаты расчетов адгезии покрытия, когда для напыления используется пересжатая детонация, которая формируется в стволах переменного сечения.

Максимальная адгезия покрытия из ВК-25, нанесенного на стальную подложку, достигает 500 МПа.

Из табл. 3 видно, что в случае пересжатой детонации можно найти режим напыления, который позволяет получать покрытия из частиц ВК-25 диаметром 10, 20, 30 и 40 мкм, когда диаметр узкой части ствола составляет всего лишь 3 мм. На практике при таких размерах узкой части ствола возникнет проблема с дозированным вводом порошка в начало узкой части ствола, но уже ствол диаметром 7.5 мм

Таблица 3

Адгезия покрытий из ВК-25, полученных при использовании пересжатой детонации смеси $C_2H_2 + 2.5O_2$ в стволах различного диаметра

Диаметр частиц, мкм	Адгезия, МПа, при диаметре узкой части, мм			
	10	7.5	5	3
10	500	500	500	500
20	500	500	500	500
30	500	500	500	340
40	500	500	280	200
60	500	500	225	0

представляет практический интерес для нанесения покрытий на мелкие детали и способствует сохранению дорогостоящих порошков.

Для иллюстрации возможностей детонации ЧЖ и пересжатой на рис. 5 показаны профили температуры газа и динамического напора потока за фронтами этих волн. Видно, что температура потока для обеих детонаций различается незначительно, в то время как динамический напор в потоке за пересжатой волной примерно в 20 раз выше, чем за детонацией ЧЖ.

Существенное преимущество режима пересжатой детонации, получаемой в сужающихся

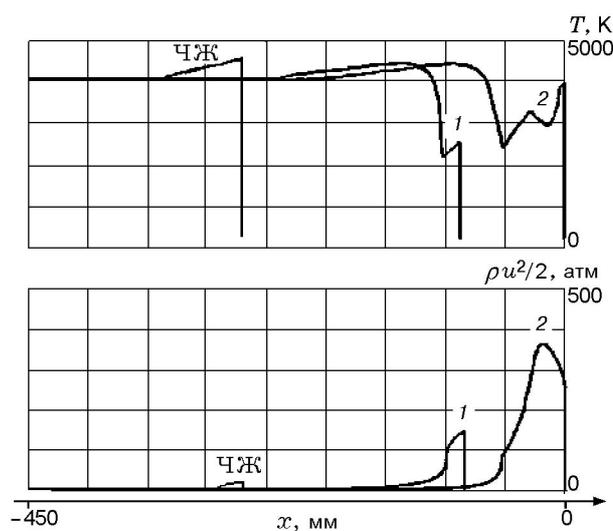


Рис. 5. Профили температуры и динамического напора продуктов детонации за фронтом пересжатой и ЧЖ волн:

1 — на границе «взрывчатая смесь — азот», 2 — на входе в узкую часть ствола

ся каналах, состоит в том, что путь разгона и разогрева частиц порошка сокращается до единиц миллиметров. Это позволяет уменьшить длину ствола установок (практически в десять раз), применять сильно разбавленные взрывчатые смеси, существенно уменьшить диаметр выходного сечения ствола, что превращает огневую часть детонационной пушки в «пистолет».

Ограничением применения пересжатых волн является дробление расплавленных частиц. Эта трудность может быть преодолена путем заполнения сужающейся и узкой частей ствола сильно разбавленной взрывчатой смесью или инертным газом. В последнем случае метание частиц осуществляется ударной волной. Расчеты [2] показывают широкие возможности таких комбинированных режимов. Положительные экспериментальные результаты получены на лабораторной установке для напыления, длина которой около 250 мм, диаметр широкой части 40 мм, а узкой — 10 мм.

На экспериментальной установке, использующей пересжатые волны, реализовано ранее невозможное напыление тугоплавких материалов (композигов типа ВК-25) с использованием узкого ствола (диаметром до 10 мм), что позволяет многократно экономить дорогостоящие материалы при обработке локальных участков поверхности (например, при обработке антивибрационных полок лопаток авиационного двигателя).

Использование пересжатых детонационных волн открывает перспективу создания детонационных микропушек, с помощью которых станут возможными серьезные продвижения в технологии нанесения покрытий, а именно: нанесение покрытий на внутренние поверхности деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Гавриленко Т. П., Николаев Ю. А. Расчет процесса детонационно-газового напыления // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 6. — С. 112–120.
3. Николаев Ю. А., Топчиян М. Е. Расчет равновесных течений в детонационных волнах в газах // Физика горения и взрыва. — 1977. — Т. 13, № 3. — С. 393–404.
4. Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е. Структура фронта детонации в газах. — Новосибирск: Наука, 1963.
5. Гавриленко Т. П., Николаев Ю. А., Топчиян М. Е. Исследование пересжатых детонационных волн // Физика горения и взрыва. — 1979. — Т. 15, № 5. — С. 119–123.
6. Гавриленко Т. П., Прохоров Е. С. Пересжатые детонационные волны в газах // Физика горения и взрыва. — 1981. — Т. 17, № 6. — С. 121–125.
7. Gavrilenko T. P., Nikolaev Yu. A., Uliantskiy V. Yu. Production of composite materials by detonation of coating using the ADU-«Ob» // X Intern. Conf. High Energy Rate Fabrication. — Ljubljana, Yugoslavia. — 1989.
8. Gavrilenko T. P., Grigoriev V. V., Zhdan S. A., Nikolaev Yu. A., Boiko V. M., Papyrin A. N. Acceleration of solid particles by gaseous detonation products // Combust. Flame. — 1986. — V. 66. — P. 121–128.
9. Бойко В. М., Гавриленко Т. П., Григорьев В. В., Карнаухов А. А., Николаев Ю. А., Папырин А. Н. Быстродействующая лазерная визуализация частиц, метаемых детонационной волной // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 3. — С. 126–133.
10. Прохоров Е. С. Динамика разгона и нагрева мелкодисперсных частиц пересжатými детонационными волнами // Динамика многофазных сред. — Новосибирск, 1984. — Вып. 68. — С. 108–115.
11. Григорьев В. В. Одновременное измерение температуры поверхности и скорости одиночных частиц, метаемых газовой детонацией // Физика горения и взрыва. — 1990. — Т. 26, № 1. — С. 129–134.
12. Prokhorov E. S. Gas detonation propagation in a medium of variable chemical composition // Proc. 4th Intern. Colloq. on Dust Explosions, Porabka-Kozubnic, Poland, 4–9 November 1990. — P. 386–401.
13. Гавриленко Т. П., Николаев Ю. А. Пределы детонационно-газового напыления // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 5. — С. 113–116.
14. Henderson S. B. Drag coefficients of spheres in continuum rarefield // AIAA Journal. — 1976. — V. 14. — P. 707–708.
15. Ивандаев А. И., Катусhev А. Г., Нигматуллин Р. И. Газовая динамика многофазных сред // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. — М.: ВИНТИ, 1981. — Т. 18.
16. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — М.: Госэнергоиздат, 1960. — С. 464.

Поступила в редакцию 20/VI 2009 г.