

СТВОЛЫ УСТАНОВОК ДЛЯ ДЕТОНАЦИОННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Ю. А. ХАРЛАМОВ, д-р техн. наук (Востоchnоукр. нац. ун-т, г. Луганск)

Рассмотрены преимущества технологического использования детонационных режимов сгорания газовых смесей, главным образом для газотермического напыления покрытий, а также разнообразные конструктивные особенности камер сгорания установок для напыления покрытий. Отмечена возможность создания процессов напыления покрытий при помощи цилиндрических детонационных волн, а также с использованием непрерывной газовой детонации.

Ключевые слова: газотермическое напыление, детонация в газах, детонационно-газовое напыление, стволы, детонационно-газовые установки

Детонационное напыление покрытий (ДНП) впервые было запатентовано в США (1952 г.), а позднее самостоятельно разработано в СССР [1–5]. Высокое качество покрытий, получаемых указанным способом, обеспечило ему успешное использование и развитие в течение более 40 лет. ДНП является одним из наиболее эффективных способов газотермического напыления (ГТНП) [6, 7]. Создание ДНП позволило впервые достичь повышения скорости напыляемых частиц. Значительно позднее появились высокоскоростные плазмотроны, а также устройства, где используется режим непрерывного высокоскоростного горения газов (ракетные камеры сгорания) [8]. Устройства высокоскоростного газопламенного напыления (ВГПН) расходуют до 10 м^3 газов для нанесения 1 кг покрытия на основе карбида вольфрама. Расход газов в таких устройствах достигает $30...150 \text{ м}^3/\text{ч}$. В последнее время этот способ получил широкое распространение в индустриально развитых странах. Однако данная система требует большого расхода газов для получения эквивалентного давления, сравнимого с детонационным процессом. С этим связаны основные недостатки ВГПН по энергетическим показателям (высокий удельный расход газов, перегрев системы основа–покрытие, необходимость интенсивного охлаждения). Современные детонационно-газовые устройства (ДГУ) для нанесения покрытий, например Super D-Gun [1, 2, 9], обеспечивают ускорение движения порошковых частиц до 1000 м/с с одновременным нагревом до температуры плавления. Причем при одинаковой производительности с ВГПН они потребляют значительно меньше горючей смеси.

Детонационные режимы сгорания газов имеют ряд полезных (в практическом отношении) особенностей. Это прежде всего достижение более высоких температур по сравнению с обычным горением (до $4000 \text{ }^\circ\text{C}$ и более при нормальном давлении). При этом важной термодинамической особенностью детонации является то, что при одинаковом тепловыделении обеспечивается меньший прирост энтропии, и в результате большая часть химической энергии топлива может быть исполь-

зована для механической работы. Это позволяет реализовать режимы напыления с более интенсивным ускорением движения напыляемых частиц. Для осуществления горения необходимо затрачивать ничтожно малое количество энергии — лишь на инициирование процесса, поскольку сам он полностью протекает за счет собственных энергетических возможностей системы. В случае плазменных процессов затраты электроэнергии на создание высоких температур огромны. Детонационные, как и другие устройства горения, надежны и отличаются большим ресурсом работы. Эти особенности детонационно-газовых процессов позволяют им конкурировать с электроплазменными. Концентрация энергии в десятикратно сжатых кислородоуглеводородных смесях достигает $1 \cdot 10^8 \text{ Дж/м}^3$, что на два порядка выше, чем в ацетиленокислородном пламени. Несмотря на весьма длительную историю развития ДНП остается наименее изученным из современных процессов ГТНП. Это прежде всего относится к детонационно-газовой аппаратуре для напыления покрытий. Практически отсутствуют публикации, посвященные конструированию узлов и агрегатов ДГУ, расчету и выбору его основных характеристик и параметров. При широком диапазоне физико-химических свойств напыляемых материалов необходимо соответствующее аппаратное обеспечение для гибкого управления параметрами импульсного гетерогенного потока с целью формирования покрытий с требуемыми характеристиками. Структура и основные требования к узлам ДГУ были рассмотрены в работах [10,11].

В данной статье показаны основные пути реализации указанных требований относительно основного узла любого ДГУ — ствола (детонационной камеры сгорания). Именно процессы, протекающие в стволе, главным образом определяют параметры гетерогенного потока, формирующего напыляемое покрытие. В самом общем случае самоподдерживающаяся детонация в газах может быть реализована с плоскими, цилиндрическими и сферическими волнами [12], причем две последние могут быть как расходящимися, так и сходящимися.

Традиционно в современных ДГУ преимущественно используют стволы цилиндрической формы, в которых реализуется явление детонации с плоскими детонационными волнами. Регулирование параметров потока напыляемых частиц осуществляют

путем изменения размеров ствола (диаметра, длины), состава горючей смеси, степени наполнения ствола горючей смесью газов и размещения исходной дозы порошка в стволе. Однако возможны и другие геометрические схемы стволов, позволяющие регулировать параметры импульсного гетерогенного потока, формирующего покрытие. В качестве основных признаков классификации стволов рассмотрим форму поперечного и продольного сечений, геометрию внутренних поверхностей, систему охлаждения и др.

Форма поперечного сечения. Принципиально можно применять стволы с квадратным, прямоугольным, овальным и другими формами поперечного сечения, если это обосновано более рациональным использованием напыляемого порошка при обработке мелких деталей или локальных участков обрабатываемых поверхностей. Применение продольных перегородок позволяет создавать стволы с увеличенными размерами поперечного сечения. Образующиеся продольные ячейки стабилизируют возникновение и распространение детонации, однако увеличивают потери энергии. Для нанесения покрытий на кольцевые поверхности относительно небольшого размера ствол может быть выполнен с кольцевым сечением. Используя этот принцип, можно наносить покрытия и на другие виды узких периметрально расположенных участков поверхностей.

Изменение поперечного сечения по длине ствола. Различают стволы с постоянным по длине поперечным сечением, изменяющимся по длине площадью (резко или плавно) и формой поперечного сечения, а также одновременно формой и площадью поперечного сечения. Одной из таких конструкций является ступенчатый ствол (рис. 1, а) с уменьшающимся поперечным сечением по направлению истечения продуктов детонации [13]. За счет возникновения отраженных волн на переходе ступеней увеличивается удельная энергия потока продуктов детонации. Для создания лучших условий течения продуктов детонации со взвешенными частицами порошка рекомендуется использовать стволы с плавно уменьшающимся поперечным сечением, в том числе коническим (рис. 1, б). При помощи таких стволов можно достичь получения пересжатых детонационных волн и усиления энергетического воздействия на частицы распыляемого порошка [14]. Выходной участок ствола

может быть выполнен с постоянным сечением, а также в виде сопла (рис. 1, в, г), что позволяет дополнительно управлять скоростной, тепловой и химической релаксацией частиц порошка. Как показано в статье [15], при использовании расширяющегося сопла можно достичь увеличения скорости частиц до 40 %. Применение сужающихся насадок приводит к уменьшению их скорости. При большом перепаде диаметров ступеней ствол может иметь луковидную форму [4]. Особенно перспективны подобные стволы при использовании горючих газов — заменителей ацетиленов. Однако в этом случае труднее обеспечить возникновение детонации и локализацию исходного порошкового облачка в заданной зоне. Частично эта задача решена в конструкции ствола, приведенной на рис. 1, д. Здесь начальный участок 1, переходящий резко или плавно в расширенный участок 2, выполнен с небольшой площадью поперечного сечения. Патрубок ввода порошка 3 и воспламенитель 4 смонтированы на входном участке у закрытого торца. Это облегчает инициирование детонации в расширенной выходной части ствола, а также способствует компактированию порошкового облачка при входе в расширенный выходной участок. Могут быть использованы конструкции стволов с плавно расширяющимся по направлению истечения продуктов детонации поперечным сечением. Схема ствола с изменяющейся по длине формой поперечного сечения показана на рис. 1, е. Переход от осесимметричного сечения к симметричному относительно одной из осевых плоскостей обеспечивает не только формирование слоя покрытия соответствующей формы, но и дополнительную турбулизацию потока газозвеси, а также ее лучшее перемешивание с продуктами сгорания, некоторое увеличение времени пребывания порошка в потоке продуктов сгорания и улучшение энергообмена между ними.

Для регулирования скорости движения и температуры частиц порошка применяют стволы с регулируемым проходным сечением. Разработана конструкция, в которой на выходном участке ствола установлены регулировочные элементы, сдвигаемые в поперечном направлении. Однако поперечный ввод порошка через регулировочные элементы затрудняет его равномерное распыление по поперечному сечению. Более удачным является ступенчатый ствол с коническим переходом между ступенями. Со стороны закрытого торца соосно в ствол вмонтировано сопло с отверстием для ввода порошка и конической головкой. Посредством осевого смещения сопла регулируют проходное сечение между коническими головкой и участком ствола. Путем изменения поперечного сечения ствола по длине обеспечивают равномерное заполнение стволов, работающих с цилиндрической детонацией, горючей смесью и порошком, а также формирование цилиндрического фронта детонации. Некоторые возможные варианты конструкций стволов для обработки деталей типа валов цилиндрическими волнами приведены на рис. 2, а–в. Отдельные участки стволов могут быть коническими или иной формы. Поэтому детонация может развиваться и распространяться как одномерная с последующим пере-

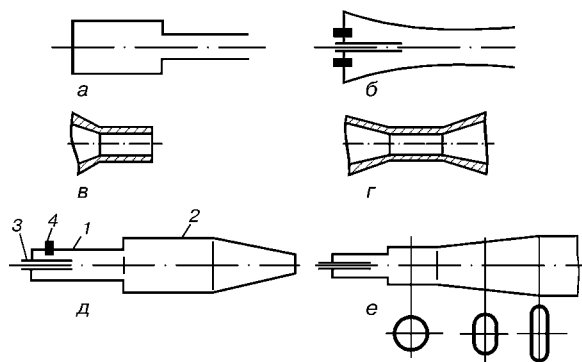


Рис. 1. Стволы с изменяющимся по длине поперечным сечением (обозначения позиций здесь и на рис. 2, 3 см. в тексте)

ходом (преобразованием) в цилиндрическую (рис. 2, *в*). На рис. 2, *г* показана схема ствола для напыления покрытий. Входная часть 1 выполнена в виде цилиндрической трубы, переходящей в выходной участок 2 в виде круглого пустотелого диска. Через закрытый торец в ствол введен патрубок 3 для подачи порошка с распылителем 4. Стволы для напыления цилиндрическими детонационными волнами могут быть выполнены с переменной в радиальном направлении высотой поперечного осевого сечения. Разделение ствола на отдельные секции может быть применено и в случае напыления цилиндрических детонационных волн. Это значительно упрощает локализацию порошкового облака и обеспечивает детонационный режим сгорания горючей смеси.

Геометрия внутренних поверхностей ствола.

Внутренние поверхности ствола могут быть гладкими и шероховатыми. В шероховатой трубе скорость детонации теряет свойство физико-химической константы смеси и зависит от аппаратных условий (степени шероховатости — чем она больше, тем сильнее падает скорость) [16]. Это явление может быть использовано для регулирования динамического и теплового взаимодействия частиц порошка с продуктами детонации. Интенсивная турбулентность, вызываемая шероховатостью, может способствовать не только интенсификации теплообмена, но и более равномерному перемешиванию порошка с продуктами сгорания. Вместо обычных проволочных спиралей лучше использовать в стенках ствола нарезные канавки различного профиля, выполняемые по всей длине ствола или на отдельных его участках. Канавки могут быть кольцевыми или винтовыми. При размещении канавок на входном участке ствола сокращается преддетонационное расстояние, а при расположении их на выходе из него улучшается перемешивание порошка и интенсифицируется теплообмен.

Форма продольного сечения ствола. По форме продольного сечения различают стволы прямые, изогнутые, разветвляющиеся, прямые с обоими открытыми торцами, петле- и U-образные, многокамерные с общей камерой зажигания, кольцевые, спиральные [3], многосекционные.

Анализ схем некоторых из этих конструкций приведен в работе [14]. В ствол могут вводиться различные экраны. Придавая им разнообразные формы, можно управлять формой и размерами исходного порошкового облака в стволе, условиями газообмена при наполнении ствола свежей горючей смесью, а также условиями формирования и истечения импульсной двухфазной струи. Таким образом, при выхлопе импульсной двухфазной струи обеспечивается ее экранирование от окружающей среды кольцевым потоком продуктов детонации, а также большая равномерность температуры и скорости движения частиц по сечению потока.

Многосекционные стволы могут быть использованы для получения пересжатых детонационных волн и увеличения времени пребывания порошка в продуктах детонации с целью обеспечения соответствующего энергообмена и степени необходимых превращений в исходном материале. Схема

одной из конструкций многосекционных стволов приведена на рис. 3, *а*. Ствол выполнен из трех concentрично расположенных секций, причем выход охватывающей секции смещен по направлению движения потока продуктов детонации относительно выхода охватываемой секции. Охватывающие секции изготовляют, как правило, с уменьшающимся по направлению истечения продуктов детонации поперечным сечением. Порошок вводится в центральную (начальную) секцию, в которой инициируется горение и детонация горючей смеси. При выходе горения на срез секции в охватывающей секции формируется два фронта горения (или детонации), один из которых продолжает двигаться к открытому торцу ствола, а второй — по кольцевому участку секции в обратном направлении. Аналогичные явления имеют место при переходе горения в следующую секцию. Использование подобных конструкций стволов с двумя и более секциями позволяет обеспечивать требуемое время пребывания порошка в продуктах детонации для протекания необходимых превращений, а также получение пересжатых волн детонации за счет подпора основного потока продуктами детонации, истекающими из охватывающих секций. Для регулирования степени превращений в распыляемых порошках секции ствола могут заполняться различными видами горючих смесей, а порошок вводится непосредственно в выходную секцию. Один из подобных вариантов показан на рис. 3, *б*. Для завихрения двухфазного потока с целью интенсификации энергообмена порошка с продуктами детонации можно использовать тангенциальное соединение секций (рис. 3, *в*). Для получения пересжатых детонационных волн можно использовать дополнительные секции в виде каналов, присоединенных к боковым стенкам основного ствола (рис. 3, *д*), а также дополнительные кольцевые секции, охватывающие ствол, в котором происходит обработка порошкового материала (рис. 3, *е*). Дополнительные секции способствуют получению пересжатых детонационных волн, увеличению длительности истечения продуктов детонации из ствола и соответствующей интенсификации процессов взаимодействия их с частицами порошка. В стволе с двумя concentрично расположенными камерами сгорания (рис. 3, *е*) формируется импульсная двухфазная струя, разделенная на центральную струю,

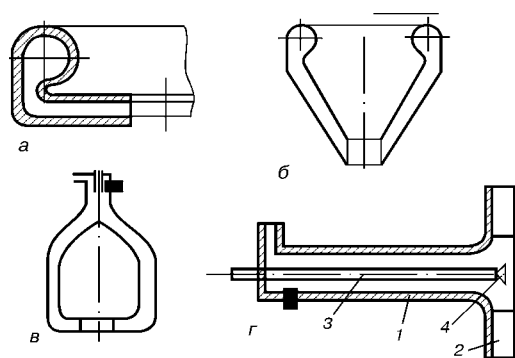


Рис. 2. Стволы для напыления покрытий цилиндрическими детонационными волнами

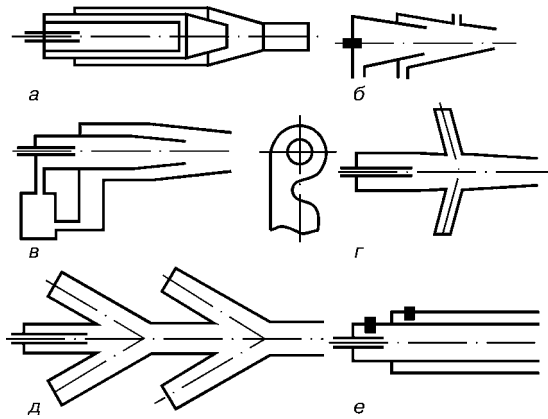


Рис. 3. Многосекционные стволы для напыления покрытий

которая несет взвешенные частицы порошка, и окружающую ее кольцевую струю продуктов сгорания.

Газодинамику сгорания газовых смесей в стволах, снабженных различными отсеками и перегородками, ни теоретически, ни экспериментально не изучали. В то же время наличие смежной незагазованной камеры, сообщающейся с основной через пропускное отверстие, оказывает решающее влияние на характер горения газовой смеси в обеих камерах: оно становится высокотурбулентным. Между камерами устанавливается перепад давления, приводящий к знакопеременному перетеканию смеси из одной камеры в другую. Давление в камерах становится в 4...15 раз выше, чем при отсутствии смежной камеры и соединении основной камеры с атмосферой отверстием суммарной площади. Характер процесса изменения давления в камерах зависит от соотношения площадей отверстий, места их расположения и зажигания, а также от концентрации топлива [17]. Все это свидетельствует о необходимости расширения экспериментальных исследований по оптимизации процессов нагрева и увеличения скорости движения порошка путем подбора геометрических параметров стволов.

Охлаждение ствола. Стабилизация температуры стенок ствола играет важную роль в обеспечении надежности работы ДГУ. Обычно применяют водяное охлаждение, и ствол охватывают полостью для принудительного перемещения охлаждающей жидкости. Конструкции стволов с водяным охлаждением достаточно подробно описаны в работах [3, 4]. Перспективно применение систем испарительного охлаждения, не требующих использования принудительной циркуляции воды и позволяющих сократить ее расход. При воздушном охлаждении на внешних поверхностях ствола создают специальные ребра охлаждения. Для охлаждения стенок ствола можно использовать воздушные принудительные потоки. Таким образом, совмещаются функции удаления загрязнений и охлаждения ствола. Может быть использовано комбинированное (воздушное и водяное) охлаждение ствола. Для нормального функционирования ДГУ создаются автономные системы водяного охлаждения.

Важной задачей является утилизация тепла, уходящего через стенки ствола, один из способов которой заключается в использовании его для пред-

варительного подогрева горючей смеси перед вводом в ствол, а также для регазификации сжиженных газов. Однако наиболее перспективным следует признать применение тепловых труб, позволяющих наиболее точно поддерживать требуемый тепловой режим стенок ствола и утилизацию тепла (для предварительного подогрева газов — компонентов детонирующей смеси, распыляемого порошка и пр.).

Возможно также использование пористого охлаждения, когда ствол выполняется с газопроницаемыми стенками и охватывается полостью охлаждения, присоединенной к системе подачи охлаждающего газа. Охлаждающий газ (азот, углекислый газ и др.) под действием перепада давления поступает из полости охлаждения на внутреннюю поверхность ствола и создает пристеночную зону с пониженной температурой. Температура пористой стенки оказывается ниже температуры непроницаемой стенки, работающей в аналогичных условиях, по двум причинам: снижается тепловой поток от рабочего тела к стенке из-за уменьшения температуры газа в пристеночной зоне (внешняя тепловая защита); часть тепла, поступившего в пористую стенку, отбирается охлаждающим газом при его движении в порах стенки (внутренняя тепловая защита). Кроме того, в процессе заполнения ствола свежей горючей смесью и порошком, охлаждающий газ, истекающий через пористые стенки в полость ствола, устраняет возможность оседания частиц порошка.

Пространственное положение ствола. Различают ДГУ с горизонтальным, вертикальным и наклонным расположением ствола. При использовании стволов сложной формы (непрямолинейных) пространственный признак следует относить к выходному участку, который применяется непосредственно для нагрева и ускорения движения порошка потоком продуктов сгорания и должен быть прямолинейным. Пространственное положение ствола влияет на компоновку ДГУ и процессы наполнения свежей горючей смесью, особенно порошком. В случае вертикального расположения улучшаются условия газообмена при наполнении ствола, исключается гравитационное осаждение порошка на вертикальные стенки, которое, однако, можно использовать при наполнении ствола. ДГУ выполняют с регулируемым наклоном ствола для более удобной настройки системы ДГУ приспособление-деталь. Изменение пространственного положения ствола используют также для перехода от режимов настройки и выхода ДГУ на стабильный режим работы к рабочему (установившемуся).

Повышение скорости стрельбы. Ведутся работы по созданию ДГУ с повышенной скорострельностью. Для этого используют газодинамические системы управления [9]. Разработан процесс напыления покрытий высокочастотной пульсирующей детонацией, осуществляемый при помощи устройства без каких-либо механически движущихся деталей и использующий для защиты от обратного удара специальные аэродинамические клапаны [18]. Это существенно упрощает конструкцию системы и обеспечивает возможность работы ДГУ в

широком диапазоне частот (скорострельности) — до 100 Гц и более без применения каких-либо циклически действующих клапанов. Следует отметить, что разработка подобной пульсирующей техники ведется с начала XX в. Однако при создании и использовании этой техники необходимо учитывать ее реальную производительность, а также изменение теплофизических и временных условий формирования напыляемых покрытий. Создание данной техники целесообразно при напылении очень крупных деталей и достаточно большой производственной программе выпуска.

Тенденцию повышения производительности ДГУ за счет возрастания их скорострельности можно выразить как стремление к непрерывному процессу сгорания горючей смеси в детонационном режиме. Определенный интерес для технологии ГТНП и др. могут представлять так называемые стоячие детонационные волны [19], реализуемые в струйном варианте. В данной статье показана такая возможность и выявлены основные физические закономерности непрерывной газовой детонации в кольцевых стволах. Под непрерывным понимается процесс, не прерываемый пока в стволе поддерживаются в определенных пределах входные параметры горючей смеси, состояние стенок и условия истечения продуктов детонации. В кольцевом стволе непрерывность детонационного горения достигается за счет многократно повторяющегося пробега одной или нескольких детонационных волн по замкнутому пути, на котором продукты реакции за очередной волной оттесняются и замещаются свежей смесью, способной к детонационному горению в той же волне на следующем обороте или в следующей волне (если их несколько). Направление движения волн является поперечным относительно общего направления протока реагентов через ствол [20].

Выводы

1. Дальнейшее развитие процессов и оборудования для детонационного напыления покрытий требует разработки оптимальных конструкций стволов на основе более глубокого изучения импульсных процессов выгорания горючих смесей и формирования импульсных гетерогенных потоков.

2. Изменение геометрии стволов установок для напыления покрытий позволяет управлять режимами выгорания горючей смеси газов, формированием и параметрами импульсного гетерогенного потока со взвешенными в нем частицами напыляемого порошка, а тем самым структурообразованием и свойствами детонационных покрытий.

3. Для повышения эффективности использования энергии импульсного сгорания и управления процессами формирования структуры и свойствами детонационных покрытий требуется исследование

Advantages of technological use of detonation conditions of burning of gas mixtures are considered, for thermal spraying of coatings in particular. Various design features of combustion chambers of the installation for spray coating are described. The feasibility of development of process of coating spraying using cylindrical detonation waves and also continuous gas detonation is outlined.

закономерностей и режимов импульсного выгорания газовых смесей в стволах нецилиндрической формы и двумерного движения в них продуктов сгорания со взвешенными частицами порошка.

4. Представляется целесообразным проведение фундаментальных и прикладных работ по созданию детонационных установок, использующих принципы непрерывной и цилиндрической газовой детонации.

1. *D-Gun for spraying wear resistant coats // Finishing.* — 1990. — **14**, № 5. — P. 24.
2. *Un Nouveau Canona detonation: Le super D-GUN d'union carbide // Industrie.* — 1990. — № 4. — P. 34–38.
3. *Шоршоров М. Х., Харламов Ю. А.* Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. — М.: Наука, 1978. — 224 с.
4. *Зверев А. И., Шаривкер С. Ю., Астахов Е. А.* Детонационное напыление покрытий. — Л.: Судостроение, 1979. — 232 с.
5. *Бартенев С. С., Федько Ю. П., Григоров А. И.* Детонационные покрытия в машиностроении. — Л.: Машиностроение, 1982. — 214 с.
6. *Мовшович И. Я., Долматов А. И., Подольский Б. А.* Технология и оборудование для нанесения покрытий с заданными свойствами детонационно-газовым методом // *Сучасне машинобудування.* — 1999. — № 1. — С. 111–115.
7. *Гаранин В. М., Иваненко А. А., Клименко С. А.* Детонационное нанесение покрытий — новые возможности в восстановлении деталей // *Там же.* — 1999. — № 2. — С. 96–99.
8. *High-velocity spray gun produces touch, hard metal coatings // Adv. Mater.* — 1991. — **13**, № 18. — P. 54–68.
9. *Тюрин Ю. Н.* Совершенствование оборудования и технологии детонационного нанесения покрытий // *Автомат. сварка.* — 1999. — № 5. — С. 13–18.
10. *Харламов Ю. А.* Конструктивные схемы детонационно-газовых установок для обработки порошковых материалов // *Порош. металлургия.* — 1986. — № 12. — С. 89–95.
11. *Харламов Ю. А.* Технологические требования к автоматизации процесса детонационно-газового нанесения покрытий // *Автомат. сварка.* — 1986. — № 1. — С. 62–67.
12. *Васильев А. А., Митрофанов В. В., Топчилян М. Е.* Детонационные волны в газах // *Физика горения и взрыва.* — 1987. — № 5. — С. 109–131.
13. *А. с. 513728 СССР, МПК В 05 В 7/20; С 23 С 7/00.* Устройство для детонационного напыления / Г. В. Самсонов, Б. Н. Двукраев, С. Ю. Шаривкер и др. — Опубл. 05.07.76; Бюл. № 18.
14. *Детонационно-газовая* аппаратура для напыления покрытий / Ю. А. Харламов, М. Х. Шоршоров, Ю. И. Писков, Б. Л. Рябошапко. — М.: ИМЕТ АН СССР, 1980. — 65 с.
15. *Григорьев В. В.* Использование сопла при метании частиц потоком продуктов газовой детонации в трубах // *Физика горения и взрыва.* — 1996. — **32**, № 5. — С. 21–29.
16. *Рыбанин С. С.* К теории детонации в шероховатых трубах // *Там же.* — 1969. — № 3. — С. 395–403.
17. *Газодинамика* горения газозвушной смеси в полужамкнутом объеме при сбросе давления в незагазованный смежный объем / Н. А. Стрельчук, А. В. Мишуев, А. Г. Никитин и др. // *Там же.* — 1984. — № 1. — С. 65–69.
18. *The high frequency pulse detonation (HFPD) spray process / I. Fagoaga, G. Barykin, J. de Juan et al. // UTSC.* — Dusseldorf, 1999. — P. 282–287.
19. *Бартльме Ф.* Газодинамика горения. — М.: Энергоиздат, 1981. — 280 с.
20. *Быковский Ф. А., Митрофанов В. В., Ведерников Е. Ф.* Непрерывное детонационное сжигание топливно-воздушных смесей // *Физика горения и взрыва.* — 1997. — № 3. — С. 120–131.

Поступила в редакцию 19.05.2001,
в окончательном варианте 09.07.2001