



ДЕТОНАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС «ПЕРУН-С» ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Е. А. АСТАХОВ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработаны основные узлы и создан промышленный образец автоматического детонационного комплекса для нанесения покрытий с расширенными технологическими возможностями, которые позволяют его успешно использовать для решения как научно-исследовательских, так и производственных задач.

Ключевые слова: детонационное оборудование, технология нанесения, стволы, дозаторы, порошкообразный материал, системы контроля, энергетические параметры, импульсные потоки, свойства покрытия

В настоящее время наметилась тенденция к возобновлению работы промышленных отраслей Украины и стран СНГ и постепенному наращиванию их производственных мощностей. Это, безусловно, повлечет за собой практическое применение различных способов нанесения покрытий для защиты поверхностей деталей, работающих в жестких условиях интенсивного износа и коррозии.

В этом аспекте детонационное нанесение покрытий остается одним из наиболее эффективных способов газотермического напыления [1–5]. С целью обеспечения высокого качества получаемых покрытий для него требуется соответствующее высокопроизводительное оборудование.

В настоящей статье освещены конструкторские решения по созданию основных узлов детонационного оборудования «Перун-С» и комплекса в целом, способствующие не только улучшению свойств напыляемых покрытий, но и расширению технологических возможностей процесса.

Автоматический детонационный комплекс «Перун-С» является совместной разработкой сотрудников Института электросварки им. Е. О. Патона и Института сверхтвердых материалов (ИСМ) НАН Украины. В ней учтен научный и практический опыт создания и использования детонационных комплексов «АДК-1» и «Прометей», реализованы новые научно-технические решения. По разработанной конструкторской документации организован их опытно-промышленный выпуск на НПО «Оргтехавтоматизация» (г. Симферополь)*.

Техническая характеристика АДК «Перун-С»

Скорострельность (частота следования рабочих циклов), Гц	3,3; 6,6
Длина основного ствола, мм	590
Длина дополнительной секции, мм	500
Площадь покрытия за цикл, мм ²	320
Толщина покрытия за цикл, мкм	3... 12

* Автор выражает признательность сотрудникам, участвовавшим в создании АДК «Перун-С», В. С. Клименко, В. С. Скадину, А. И. Кильдию, А. А. Полонскому, В. Н. Колесниченко, Ю. Н. Ильченко, А. А. Мозжухину, а также руководству Института электросварки им. Е. О. Патона, Института сверхтвердых материалов и НПО «Оргтехавтоматизация» за оказанную помощь в организации работ по выпуску опытно-промышленного оборудования и внедрению процесса в производство.

Коэффициент использования порошка, %	40... 60
Расход рабочих газов, м ³ /ч:	
ацетилен	1,0... 1,2
пропан-бутан	0,9... 1,1
водород	3,2... 3,6
кислород	2,0... 2,4
азот	4,6... 8,2
сжатый воздух	4,6... 5,2
Пределы перемещения устройства нанесения покрытий, м:	
вправо-влево	1,5
вперед-назад	0,85
вверх-вниз	0,20
Потребляемая мощность, кВт	2
Напряжение питания, В	220; 380
Частота, Гц	50

Внешний вид комплекса «Перун-С» показан на рис. 1.

В состав комплекса входят устройство для абразивной обработки и нанесения покрытий (пушка), газораспределительный пульт, устройство перемещения (манипулятор) пушки, блоки управления пушкой и манипулятором, устройство контроля нанесения покрытий. Для размещения указанного оборудования с целью его промышленной эксплуатации необходим звукоизолированный бокс (площадь не менее 15 м²), снабженный средствами принудительной вентиляции, и операторская (8 м²), сообщающаяся с боксом и имеющая смотровое окно в него. Управление технологическим процессом осуществляется дистанционно из операторской.

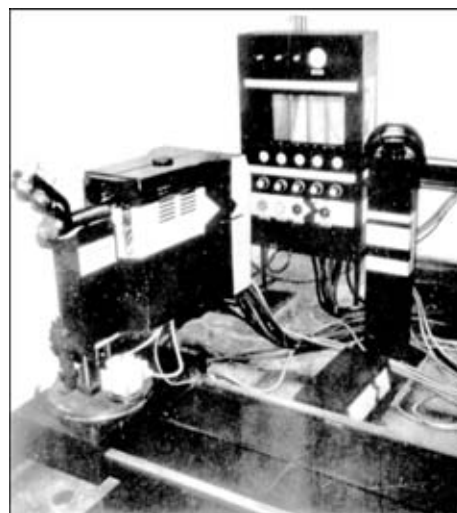


Рис. 1. Внешний вид АДК «Перун-С»

Работа устройства нанесения покрытий осуществляется по способу, отличающемуся от ранее используемого тем, что рабочие газы, например, кислород и ацетилен, подаются в камеру сгорания в виде смеси непрерывно в стационарном режиме истечения, а периодичность процесса с отсутствием контакта горючей газовой смеси с продуктами детонации достигают посредством периодической подачи нейтрального газа (азота, воздуха) в промежутках между подачей порошкообразного материала и воспламенением газовой смеси. При этом в результате превышения в 2,5... 3,0 раза давления азота продувки по сравнению с давлением подачи рабочих газов происходит запираание последних.

В этом случае хотя и сохраняется цикличность процесса, но на каждый цикл поступает уже готовая порция взрывчатой смеси с заданной концентрацией ингредиентов, что позволяет повысить качество покрытий за счет однородности газовой смеси по объему [5].

Ствол. Одним из основных и наиболее важных элементов детонационных установок является ствол (взрывная камера) [3, 5], в котором осуществляется перемешивание взрывчатой смеси с порошком напыляемого материала, протекает процесс детонации и формируется высокоскоростной поток продуктов взрыва со взвешенными в них частицами напыляемого материала.

Ствол должен обеспечивать требуемый уровень энергетических параметров импульсного потока продуктов сгорания, достаточный для нагрева и ускорения оптимальной дозы порошка при наиболее эффективном использовании выделяемой при сгорании горючей смеси энергии.

Ранее применяемые стволы имели длину 1300... 2500 мм [3, 6, 7]. Впервые в практике использования детонационного напыления длина ствола была уменьшена до 590 мм. Это позволило снизить расход рабочих компонентов и при неизменном начальном давлении подачи их в ствол увеличить скорострельность, тем самым повысив производительность процесса напыления.

Для управления степенью нагрева частиц ствола сделан секционным. Удлинение основного ствола до 1100 мм происходит посредством установки добавочной секции.

Дозирующее устройство. В установке использован дозатор с импульсной осевой подачей напыляемого материала. Дозаторы такого типа, как правило, имеют ограниченный объем бункера, поскольку вдуваемая доза порошка в ствол находится в прямой зависимости от уровня порошка в бункере. С его понижением уменьшается и вдуваемая доза порошка [8]. Это требует постоянной досыпки порошка в дозатор. Разработанная система поддува (увеличение давления азота на транспортировку порошка по мере выработки его из бункера) позволила несколько стабилизировать дозу и увеличить продолжительность работы установки до дозаправки дозатора, но повлекла за собой частичное увеличение расхода азота и, как следствие, ухудшение свойств покрытий.

В конструкции дозатора, используемого в АДК «Перун-С» (рис. 2), удалось устранить указанный недостаток.

Разработанный дозатор состоит из цилиндрического стакана 1, который закрывается крышкой 2, связанной с внутренним стаканом 7. Две скрепленные резиновые прокладки 8, 9 образуют подвижное днище корпуса. Снизу дозатор прижимается пневмоцилиндром к крышке 3 узла установки питателей. В крышке имеется три штуцера 4–6. Через штуцер 6 подается транспортирующий газ, который захватывает порошок, через штуцер 5 — газопорошковая смесь поступает в ствол. Для поддержания постоянного уровня порошка в дозаторе с целью обеспечения стабильной плотности газопорошковой смеси в процессе напыления предусмотрен подъем днища корпуса по мере расхода порошка. Это достигается путем подачи сжатого воздуха через штуцер 4 в полость между наружным стаканом и днищем. Давление воздуха регулируется распределителями пневмоблока, который управляется от системы контроля наличия порошка в продуктах детонации.

Объем одного дозатора обеспечивает стабильную подачу порошка ВК15, например, в течение 2 ч непрерывной работы установки со скорострельностью 3,3 Гц.

Системы оперативной диагностики технологического процесса. Оценка качества покрытий, получаемых способами высокотемпературного напыления, в настоящее время осуществляется путем испытания таких же покрытий на образцах-свидетелях. Надежные средства неразрушающего контроля качества покрытий, нанесенных на натурные изделия, пока отсутствуют. Поэтому к детонацион-

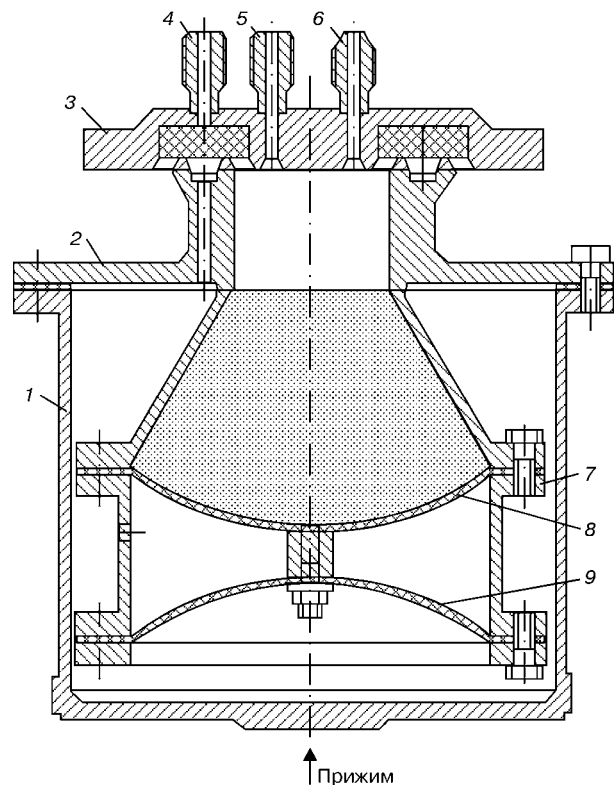


Рис. 2. Конструкция дозатора с подвижным днищем корпуса (обозначения 1–9 см. в тексте)



ным установкам предъявляются повышенные требования в отношении стабильности их работы для гарантирования идентичности свойств покрытий на изделиях. Под стабильностью работы установки подразумевается постоянство энергетических характеристик частиц напыляемого материала при формировании слоев покрытия.

Опыт эксплуатации детонационного оборудования свидетельствует о том, что возможны случаи, когда показания контрольных приборов, установленных в газовых магистралях, изменяются в допустимых пределах, а технология процесса и условия формирования покрытий резко нарушаются. Чаще всего причиной таких нарушений является изменение дозы порошка, подаваемого в ствол перед взрывом газовой смеси. Это происходит либо в связи с уменьшением сечения канала магистрали, соединяющей дозатор со стволом (из-за налипания на стенках канала спекшихся частиц порошка), либо по причине нарушения герметичности этой магистрали, либо в связи с уменьшением количества порошка в бункере дозатора.

Для быстрого и своевременного выявления нарушений технологии напыления покрытий создано устройство, контролирующее параметры импульсного металлизационного потока [9].

Устройство контроля предназначено для визуальной регистрации (на основании показаний измерительного прибора) наличия или отсутствия порошка напыляемого материала в продуктах детонации, истекающих из ствола установки после инициирования взрыва. Оно позволяет также (после его предварительной тарировки) определить количество порошка, содержащегося в продуктах детонации. Для этого измерительный прибор тарируется либо в массовых долях порошка, либо по толщине покрытия, формируемого за один цикл.

Принцип действия устройства основан на явлении увеличения интенсивности светового излучения от высокотемпературного потока продуктов детонации при наличии в нем нагретых частиц порошка напыляемого материала. Установлено, что интенсивность светового излучения возрастает пропорционально количеству содержащегося в продуктах детонации порошка.

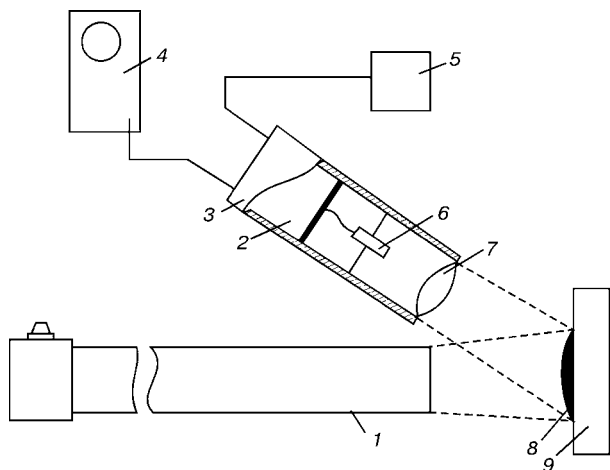


Рис. 3. Схема прибора для обнаружения скрытых дефектов в слое покрытия при напылении (обозначения 1–9 см. в тексте)

Устройство контроля наличия порошка в продуктах сгорания через свою систему управления может влиять на работу исполнительных органов детонационной установки.

В случае отсутствия частиц порошка в продуктах детонации, а также при «осечке», т. е. пропуске выстрела из-за невоспламенения взрывчатой смеси в камере, датчик цепи обратной связи подает сигнал на блок управления, и установка выключается.

Установка при единичном пропуске может и не выключаться, а следующий непосредственно за пропуском выстрел, содержащий увеличенную дозу порошка, попадает в защитную шторку, перекрывающую в этот момент поверхность напыляемого изделия, что обеспечивает стабильное качество напыляемого покрытия.

Однако возможность контроля интенсивности излучения металлизационного потока не всегда является гарантией формирования качественного покрытия. Например, вследствие некачественных очистки или абразивной обработки участка поверхности основы на нем может произойти отслоение напыленного покрытия. Данный дефект может быть обнаружен сразу после нанесения покрытий путем внешнего осмотра с применением лупы или при шлифовке.

В процессе разработки комплекса «Перун-С» предложен способ и разработано устройство для обнаружения скрытых дефектов площадью более $0,2 \text{ см}^2$ непосредственно в процессе нанесения детонационных покрытий.

При ударе о подложку нагретых до температуры плавления частиц порошка напыляемого материала происходит их быстрая деформация (в течение $0,1 \dots 0,3 \text{ мкс}$) и охлаждение [6, 7]. Одновременно протекают физико-химические процессы, способствующие сцеплению отдельных частиц между собой и подложкой. Скрытые макродефекты (типа отслоений) образуются сразу после формирования покрытия и его охлаждения. В связи с изменением в зоне дефекта условий передачи в подложку тепла при воздействии на покрытие высокотемпературного газового или металлизационного потока могут обнаруживаться эффекты, регистрация которых позволяет выявить в нем отслоения и крупные поры. Теоретическое описание этих эффектов базируется на результатах расчетов температуры поверхности $T_{\text{п}}$, деформируемых частиц, закрепляющихся на подложке в процессе напыления.

Анализ результатов расчетов $T_{\text{п}}$ при напылении никеля и оксида алюминия позволил сделать следующие выводы [10]:

при наличии макродефекта между верхним слоем покрытия и деталью (с покрытием или без него) температура поверхности нового напыленного слоя сразу после его формирования гораздо выше температуры на поверхности бездефектного участка покрытия;

по мере наращивания толщины покрытия над макродефектом температура его поверхности после напыления новых слоев уменьшается.

Схема работы прибора, осуществляющего такой контроль, изображена на рис. 3. Перед срезом

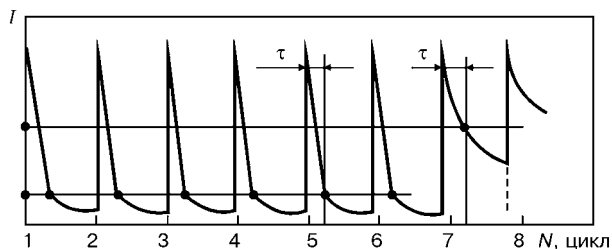


Рис. 4. График изменения интенсивности излучения I поверхности слоя покрытия в случае наличия и отсутствия в нем дефектов; N — количество циклов

ствола 1 детонационной установки помещают деталь 9, на поверхность которой необходимо нанести покрытие 8. На стволе 1 закрепляют фотодатчик 3, содержащий оптическую систему 7, фотоэлемент 6 и электрически связанный с ним предварительный усилитель 2. Фотодатчик 3 располагают таким образом, чтобы его оптическая ось была направлена в середину пятна покрытия 8. Предварительный усилитель 2 подключают к источнику 5 постоянного напряжения, а выход усилителя 2 — к входу осциллографа 4.

При работе детонационной установки из ствола 1 периодически истекает высокотемпературный поток продуктов детонации, в котором содержатся разогретые (в оптимальном случае до предплавильной температуры) частицы порошка напыляемого материала. В момент формирования слоя детонационного покрытия 8 вследствие удара нагретых частиц порошка о поверхность детали 9 интенсивность лучеиспускания или яркость пятна формируемого покрытия 8 сначала велика. Об этом свидетельствуют пики (рис. 4) сигналов от фотодатчика 3, посредством которых на осциллографе оценивают температуру поверхности пятна покрытия 8.

За время между двумя очередными выстрелами детонационной установки (300...600 мс) температура поверхности покрытия 8 снижается практически до температуры детали 9, что также регистрируется на экране осциллографа 4 благодаря сигналам от фотодатчика 3, амплитуды которых уменьшаются за это время фактически до нуля. Быстрое снижение температуры поверхности происходит вследствие интенсивной передачи тепла в объем детали 9 благодаря хорошему контакту с ней всей плоскости напыленного слоя покрытия 8.

В случае образования под напыленным слоем макродефекта (например, трещины) скорость охлаждения поверхности покрытия 8 резко падает, т. е. покрытие над дефектом гораздо дольше остается нагретым из-за плохой передачи тепла через трещину, факт появления микродефекта регистрируется на осциллографе 4 по относительноному увеличению амплитуды сигнала, поступающего от фотодатчика 3 через 20...40 мс после выстрела, которым было нанесено дефектное покрытие. Уровень этого сигнала уже не уменьшается до нуля, как в случае формирования бездефектных слоев покрытия при предыдущих выстрелах, а падает гораздо медленнее. Это происходит потому, что покрытие, под которым имеется трещина, значительно дольше излучает свет.

Система управления и регулирования технологическим процессом напыления. Пульт управления АДК «Перун-С» состоит из трех независимых блоков, собранных в одном корпусе:

устройства позиционирования установки, в котором размещены все элементы управления и контроля перемещения на манипуляторе, задания режима и скорости перемещения;

блока управления, где размещаются все элементы управления работой установки; с его помощью задаются цикличность работы исполнительных механизмов устройства и режим работы питателей, поддерживается уровень порошка в них в процессе напыления, фиксируется количество рабочих циклов при подаче порошка из первого и второго питателей;

блока контроля за качеством и составом металлургического потока, его массой и качеством контроля, а также температурой ствола.

Для выдачи сигналов на срабатывание исполнительных органов установки использован момент замыкания соответствующего геркона вращающимся магнитом. Такое конструкторское решение позволило устранить недостатки электромеханического командоаппарата [6] и обеспечить гибкую систему изменения временных интервалов их срабатывания относительно друг друга.

Газораспределительный пульт подачи рабочих сред. Характерной особенностью многоканального пульта является наличие в каждой из магистралей рабочих сред высокоточных регуляторов перепада давления, стабилизирующих выходные параметры газовых потоков независимо от изменения таковых на их входе и падение давления в баллонах.

Использование фторопластового поплавка в ротаметре для подачи газа в дозатор и прямое дросселирование его потока обеспечивают высокую степень точности подачи напыляемого порошкового материала (даже для плохосыпучих). При этом повышается надежность работы всего комплекса в целом.

Манипулятор перемещения установки. Трехординатный манипулятор перемещения устройства напыления позволяет напылять плоские поверхности любого размера. Для напыления тел вращения необходима доукомплектация вращателем. Удачным для практического использования является вращатель сварочный универсальный модели 1111020 [11] с плавной бесступенчатой регулировкой частоты вращения в пределах 0,1...5,0 об/мин. Его максимальная грузоподъемность составляет 100 кг.

Принципиальные технологические возможности АДК «Перун-С». Эксплуатация разработанного оборудования возможна при использовании различных рабочих газов (в качестве горючего, кроме ацетилена, может применяться пропан-бутан либо водород, а для транспортирования порошка, продувки змеевика и ствола, разбавления взрывчатой смеси допустимо использование как азота, так и сжатого воздуха).

Классический вариант работы детонационных установок основан на применении в качестве горючего газа ацетилена, поскольку его смеси с кис-



Наименование деталей	Место проведения напыления
Магнитозаписывающие устройства	НПО «Маяк», г. Киев, Украина
Штоки гидроцилиндров, подшипниковые узлы, поршневые пальцы, несущие шейки вала, коленчатые валы судовых двигателей	ПСО «Югрыбсудоремонт», г. Севастополь, Украина
Ножи промышленных швейных машин, высоковольтные вводы источников, торцевые уплотнения электроклапанов	НПО «Оргтехавтоматизация», г. Симферополь, Украина
Контактные поверхности деталей и узлов авиационной техники (бандажные полки компрессорных лопаток, сегменты туннельного вентилятора ГТД, топливные форсунки)	Казанский филиал НИИД, г. Казань, РФ
Пильные диски для резки горячего проката, гидроштоки, пресс-формы для литья под давлением	Витковицкий металлургический комбинат, г. Острава, Словакия
Узлы нефтеперекачивающих насосов (эмпиерные втулки, подшипники скольжения, лабиринтные уплотнения)	Управление нефтепровода «Дружба», г. Ровно, Украина
Детали сельскохозяйственной техники	Сельхозакадемия, г. Каунас, Литва
Корпуса и роторы водородного насоса, плиты рассеивочной машины, валы насосов	Фирма «СУКТЕК», г. Куопио, Финляндия

лородом отличаются высокой скоростью детонации, сильным динамическим напором газового потока и его температуры за фронтом детонационной волны. Кроме этого, в них практически отсутствует преддетонационный участок.

При использовании ацетилено-кислородных смесей необходимо соблюдение повышенных требований техники безопасности как к работе на оборудовании, так и к производственному участку напыления в целом. Все это усложняет конструкции из-за необходимости введения в их состав систем и узлов защиты от обратных ударов.

Анализ литературных данных [12] и выполненные расчеты свидетельствуют о том, что динамические характеристики газового потока за фронтом детонации в стехиометрических ацетиленово-кислородных, пропан-бутановых и метан-кислородных смесях практически одинаковы, а у пропан-бутана с кислородом даже выше на 5... 10%. Достижение практических результатов и создание соответствующего оборудования Институтом проблем материаловедения им. И. Н. Францевича, ИЭС, ИСМ НАН Украины и Политехническим институтом (г. Калинин, РФ) стало возможным благодаря теоретическим расчетам сотрудников Института гидродинамики им. М. А. Лавреньева СО РАН (г. Новосибирск) под руководством Т. П. Гавриленко [13].

При решении вопроса об использовании в качестве горючего газа водорода внимание разработчиков было сосредоточено на замене газобаллонного обеспечения газообеспечением от электролизера. По этому принципу разработана малогабаритная установка повышенной автономности — «Перун-М». В ее общем корпусе собраны воедино устройство для абразивной обработки и нанесения покрытий, звукоизолирующая камера, устройство перемещения обрабатываемых изделий, газогенератор (электролизер), блок управления и контроля. Площадь, требуемая для ее размещения, составляет около 5 м², для функционирования необходима только электроэнергия. Организация промышленного выпуска электролизеров с повышенной производительностью в сочетании с применением компрессора позволит решить проблему газообеспечения водородом и кислородом детона-

ционной установки «Перун-С» и ее нормального функционирования в производственных условиях, где затруднено газобаллонное обеспечение.

Блок управления работой установки позволяет производить напыление при скорострельности 6,6 и 3,3 Гц и изменять местонахождение частиц напыляемого материала в канале ствола относительно момента инициирования рабочей смеси. Это дает возможность варьировать в широких пределах их скорость и степень нагрева в момент формирования слоя покрытия; влиять на степень их окисления и изменение химического и фазового составов.

Оснащение установки двумя независимо управляемыми порошковыми дозаторами позволяет переходить с режима детонационно-абразивной обработки на режим нанесения покрытий без выключения установки; осуществлять абразивную обработку и напыление в одном цикле; напылять двухкомпонентное покрытие без предварительного приготовления смесей и регулирования их процентного содержания; изменять состав рабочей смеси по длине ствола (один из дозаторов подает газ без порошка); напылять размерное покрытие или покрытия с минимальным припуском на обработку на больших поверхностях благодаря стабильной работе дозатора (изменение дозы вдуваемого порошка в процессе работы составляет не более 8 %).

Конструкция секционного ствола позволяет устанавливать специальные насадки для изменения профиля пятна напыления, перераспределения концентрации напыляемых частиц в потоке по сечению ствола, напыления на внутренние поверхности труб.

В таблице приведен перечень основной номенклатуры изделий, упрочненных детонационным напылением, а также организаций, создавших для этих целей производственные участки с использованием АДК «Перун-С».

Разработанное оборудование используется при выполнении научно-исследовательских работ в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины (г. Киев), ИСМ НАН Украины (г. Киев), Институте термоэлектрики НАН Украины (г. Черновцы), Техническом университете (г. Таллинн, Эстония), Университете технологии (г. Тампере, Финляндия).

Специалисты ИЭС и ИСМ оказывали техническую помощь в создании производственного участка для напыления, монтаже и наладке оборудования, обучении персонала работе на оборудовании, разработке и освоении технологии напыления.

Эксплуатация данного оборудования в течение десяти лет подтвердила эффективность реализованных конструкторских и технологических решений (особенно это касается систем контроля и дозирующего устройства).

Благодаря нанесению износостойких и коррозионностойких покрытий срок службы изделий увеличивается в 2,5...10,0 раз.

Перечень основных материалов, применяемых для детонационного напыления, и свойства покрытий из них подробно освещены в работах [1, 5, 6, 14].

Выводы

1. Доказана возможность использования при детонационном напылении покрытий в качестве горючего газа пропан-бутана, что упростило конструкцию установок и снизило требования техники безопасности к производственному участку.

2. Использование устройства контроля технологического процесса позволило объективно оценивать стабильность работы порошкового дозатора путем регистрации количества порошка в высокотемпературном импульсном потоке, прогнозировать толщину или массу нанесенного покрытия, а также контролировать качество формируемых слоев, выявляя скрытые макродефекты.

3. Впервые предложен способ и разработано устройство для проведения в одном цикле одновременно абразивной обработки напыляемой поверхности и напыления на нее слоя покрытия, что повысило производительность процесса и снизило себестоимость.

4. Использование манипулятора перемещения установки в сочетании с вращателем дало возможность напылять изделия практически любых размеров с простым и сложным профилем.

5. Длительная эксплуатация автоматического детонационного комплекса «Перун-С» в различных производственных условиях подтвердила, что он является высокопроизводительным стационарным оборудованием. Промышленное использование особенно эффективно при массовом или крупносерий-

ном производстве изделий с покрытиями, разнообразном перечне номенклатуры деталей. Технологические возможности комплекса обеспечили широкие перспективы для проведения научно-исследовательских работ по дальнейшему совершенствованию детонационного оборудования и технологии; нанесению различных композиций; исследованию способа их подготовки и характера распределения в них компонентов на свойства композитного покрытия.

1. *Тюрин Ю. Н.* Совершенствование оборудования и технологий детонационного нанесения покрытий // Автомат. сварка. — 1999. — № 5. — С. 13–18.
2. *Астахов Е. А., Борисов Ю. С., Кильдий А. И.* Промышленная технология и оборудование для детонационного нанесения покрытий: Тез. междунар. конф. «Сварка и родственные технологии в XXI век». — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1998. — С. 7.
3. *Харламов Ю. А.* Стволы установок для детонационного напыления покрытий // Автомат. сварка. — 2001. — № 10. — С. 17–21.
4. *Гавриленко Т. П., Николаев Ю. А., Ульяницкий В. Ю.* Новые материалы и технологии // Теория и практика упрочнения материалов в экстремальных условиях. — Новосибирск: Наука, 1992. — С. 2–15.
5. *Детонационное* напыление упрочняющих покрытий и пути его развития / К. А. Ющенко, Е. А. Астахов, В. С. Клименко, Ю. С. Борисов // Новые процессы и оборудование для газотермического и вакуумного покрытия. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1990. — С. 26–32.
6. *Зверев А. И., Шаривкер С. Ю., Астахов Е. А.* Детонационное напыление покрытий. — Л.: Судостроение, 1979. — 232 с.
7. *Шоршоров М. Х., Харламов Ю. А.* Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. — М.: Наука, 1978. — 224 с.
8. *Дозирующие* устройства для детонационного напыления / Е. А. Астахов, А. И. Зверев, С. Ю. Шаривкер, В. И. Пашенко // Порошк. металлургия. — 1979. — № 3. — С. 75–78.
9. *Рефлексные* детонационные установки / В. С. Клименко, В. Г. Скадин, Е. А. Астахов, И. А. Зверев // Детонационные покрытия. — Калинин, 1980. — С. 35–42.
10. *Клименко В. С., Борисова А. Л., Скадин В. Г.* Технология детонационного напыления покрытий / АН УССР. Ин-т пробл. материаловедения. — Препр. — Киев, 1983. — 61 с.
11. *Каталог* механического сварочного оборудования. — М.: Изд. ВНИИТЭМР, 1986. — 62 с.
12. *Двукравев Б. Н.* Термогазодинамические параметры детонационного напыления // Порошк. металлургия. — 1976. — № 2. — С. 62–65.
13. *Вопросы* использования детонации в технологических процессах // Сб. науч. тр. Института гидродинамики СО АН СССР. — Новосибирск, 1986. — 141 с.
14. *Астахов Е. А., Филитов Д. Т.* Детонационное напыление для восстановления и упрочнения деталей судоремонтного производства. — Киев: О-во «Знания» УССР, 1988. — 19 с.

Main sub-assemblies are designed and an industrial prototype of automatic detonation complex was manufactured for coating deposition with wide technological capabilities, which allow its successful use for the solution both of research and production problems.

Поступила в редакцию 17.07.2002,
в окончательном варианте 08.11.2002