

## РЕФЕРАТ

**УДК 629.12.037.4**

*Ключевые слова:* аддитивные технологии, плазмотрон, номенклатура восстанавливаемых деталей, плазменные и плазменно-ультразвуковых процессы, модульный синтез технологий восстановления.

**Баёв А.С.** Прообраз аддитивных технологий и нанотехнологий восстановления и упрочнения деталей судового оборудования.

### Аннотация

Рассмотрены сущность плазменных процессов нанесения покрытий, номенклатура восстанавливаемых деталей и принципы её обоснования, возможности плазменных и плазменно-ультразвуковых технологий и модульные способы их создания, приемы и параметры основных операций восстановления деталей типа «вал».

## **ПРООБРАЗ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ СУДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Как известно, аддитивные технологии – это макротехнологии послойного синтеза изделий с помощью 3D-принтеров, а нанотехнологии – это микро-технологии создания объектов, включающих компоненты размерами менее 100 нм по одной или более координатах. Эти технологии, как по отдельности, так и особенно в совокупности обладают самыми широкими возможностями. В связи с этим принято считать, что в XXI веке аддитивные технологии и нанотехнологии станут основой новой промышленной «революции» (Индустриализации 4.0).

Между тем современный ренессанс этих технологий в частности в судостроении и судоремонте обязан, в том числе и успехам по использованию плазменных технологий.

В начале 80-х годов прошлого столетия согласно Постановлению Совета Министров РСФСР по внедрению методов порошковой металлургии при восстановлении изношенных деталей машин и механизмов [1] на базе Ленинградского института водного транспорта (ЛИВТ) была организована профильная лаборатория, руководство которой было возложено на автора - Ученого секретаря Координационного Совета Минречфлота РСФСР по направлению «Судостроение и судоремонт» (1980-1987 г.г.).

На основе анализа существующих способов восстановления деталей [2] было установлено, что наиболее прогрессивными являются плазменные тех-

нологии [3], которые в отрасли оказались недостаточно освоенными как в организационно-техническом плане, так и в кадровом и особенно технологическом обеспечении.

С учетом имевшегося производственного потенциала промышленных предприятий отрасли организационно-техническое обеспечение массового восстановления деталей строилось в форме специализированных участков на базе отечественных плазменных установок типа УПУ Ржевского ПО «Электромеханика» и УМП Барнаульского аппаратурно-механического завода, а также швейцарской установки «ЮТроник-плазма». Подготовка кадров выполнялась через факультет повышения квалификации ЛИВТ [4], а технологические процессы восстановления деталей прорабатывались на базе созданной лаборатории и специализированных участков судостроительно-судоремонтных заводов отрасли с предварительным проведением исследований по выявлению целесообразной номенклатуры восстанавливаемых деталей и оптимальных параметров плазменного напыления.

При плазменном нанесении покрытий используются тепловые и динамические свойства плазменной струи (частично или полностью ионизированного газа), которая получается нагревом плазмообразующего газа в электрической дуге, горящей между катодом и анодом плазмотрона (рисунок 1).

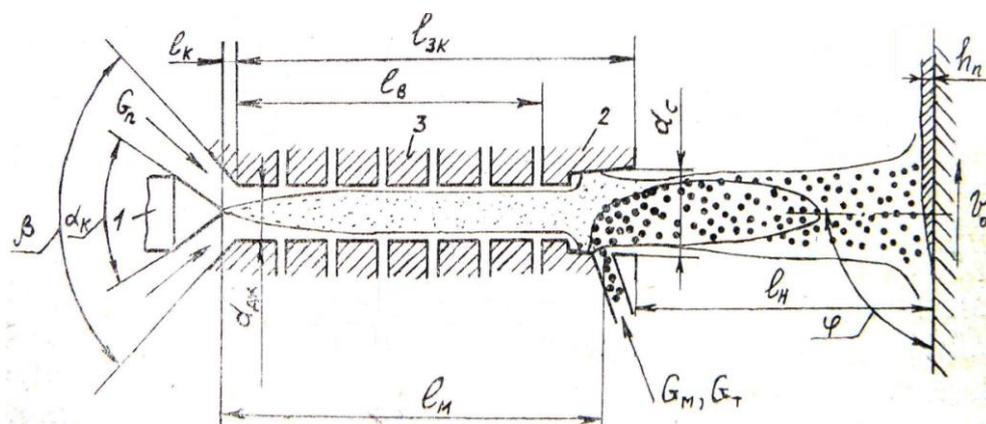


Рисунок 1. Схема процесса плазменного напыления:

1 - катод; 2 – анод; 3 – секции межэлектродной вставки;  $\beta$  – конусность входной вставки;  $\alpha_k$  – угол заточки катода;  $\varphi$  – угол между осью плазмотрона и напыляемой поверхностью;  $G_n$  – расход плазмообразующего газа;  $G_m$  – расход напыляемого материала;  $G_t$  – расход транспортирующего газа;  $d_{dk}$  и  $l_{zk}$  – диаметр и длина дугового канала;  $d_c$  – диаметр сопла;  $l_n$  – дистанция напыления;  $h_n$  – толщина покрытия;  $v_0$  – скорость перемещения детали;  $l_m$  – расстояние от катода до места ввода напыляемого материала.

В зависимости от плазмообразующего газа, в качестве которого могут использоваться аргон, азот, гелий, водород, природный газ, воздух (например, в установке УН-108) и их смеси, температура плазменной струи может достигать 10000 градусов Цельсия и более. При напылении материал

подается в сопло плазмотрона транспортирующим газом, в качестве которого чаще применяются те же газы. Высокая температура и большая скорость плазменной струи ( $2M$  и более, где  $M$  – число Маха) позволяют обеспечивать лучшие адгезию (прочность сцепления покрытия с основой) и физико-механические свойства покрытий по сравнению с другими способами газотермического напыления.

Способ плазменного напыления универсален как в отношении металла деталей, так и напыляемых материалов, номенклатура которых в виде порошков (свыше 300 марок), проволоки диаметром до 1,5 мм, прутков диаметров до 3 мм и гибких шнуров (керамических композиций) позволяет получать широкий диапазон свойств покрытий (износостойкость, термостойкость, жаропрочность, эрозионно-кавитационную и коррозионную стойкость и т.д.). Без деформации и с сохранением структуры наиболее успешно восстановлению плазменным напылением поддаются детали вращения диаметром больше 40 мм с износами до 1,5 мм наружных и до 1,0 мм внутренних поверхностей. Восстановление деталей, работающих в условиях ударных нагрузок, обычно выполняется плазменным напылением с оплавлением, что повышает адгезию в 8...10 раз.

Исходя из этих возможностей и пригодности деталей при затратах на восстановление менее 70% стоимости новых, целесообразная номенклатура деталей, подлежащих восстановлению плазменным напылением, составила около 200 наименований и типоразмеров [5], в том числе, детали судовых дизелей (коленчатые и распределительные валы, фундаментная рама, вкладыши подшипников, валы навесных механизмов, поршневой палец, клапаны и т. п.), судового вспомогательного оборудования (насосов, компрессоров) и винто-рулевого комплекса (гребной, промежуточный и упорные валы, гелмпортные втулки). При этом пригодными к восстановлению считались детали, работоспособность которых с учетом характера и значения износа, толщины слоя, снимаемого перед нанесением покрытия, оказывалась достаточной для обеспечения надежной их работы в течение очередного ремонтного периода. Работоспособность деталей устанавливалась по уровню их конструктивной прочности, жесткости и сопротивлению усталости. Между тем, поскольку в зависимости от условий работы работоспособность деталей обычно определяется каким-то преимущественным видом разрушения, то оценка пригодности к восстановлению производилась по показателю, характеризующему этот вид разрушения. Например, для статически нагруженных корпусных деталей таким показателем является конструктивная прочность, а для деталей, работающих при циклических нагрузках, требуется еще и оценка усталостной прочности, так как

плазменное напыление без дополнительных противоусталостных мероприятий приводит к заметному её снижению.

При таком подходе оказалось, что некоторые детали были непригодны к восстановлению (втулки цилиндров по внутреннему диаметру, анкерные связи, и т.п.), другие - требовали сложной индивидуальной оснастки (корпуса насосов, редукторов и т.п.), а восстановление третьих - нецелесообразным, в том числе, например, гребных валов, конструкция которых не удовлетворяла соотношениям (1), (2) и (3).

$$l_2 \{3,3[1 + 1,87\Theta * D_B^3 / (\gamma l_2 d_r^2)]\}^{1/3} < l_1 \leq 20d_r - l_2; \quad (1)$$

$$n_r \leq 102500 \{1 - 3,3(l_2/l_1)^3 [1 + 1,87\Theta * D_B^3 / (\gamma l_2 d_r^2)]\} d_r / (l_1)^2; \quad (2)$$

$$Y \leq 32150000 [1 - (n_r/n_{кр})^2] (d_r)^4 / (l_1)^2, \quad (3)$$

где  $l = l_1 + l_2$ ;  $l_1$  и  $l_2$  – длина дейдвудного пролета и консоли гребного вала, м;  $d_r > 1,1d + 10D_B$  – диаметр гребного вала, м;  $d$  – стандартный расчетный диаметр валов валопровода по Регистру, м;  $D_B$  и  $\Theta$  – диаметр в м и дисковое отношение гребного винта;  $\gamma$  – удельный вес материала гребного вала в кН/м<sup>3</sup>;  $n_r$  – номинальная частота вращения гребного вала, об/мин;  $Y$  – упор гребного винта на номинальном режиме работы, кН;  $n_{кр}$  – критическая частота вращения гребного вала по Бринеллю, об/мин;  $[1 - (n_r/n_{кр})^2] = 0$  при  $n_r \geq n_{кр}$ .

Следует отметить, что плазменные технологии – процессы многофакторные и многопараметрические. Их эффективность зависит, в том числе, и от конструкции плазмотронов (рисунок 1), состава и грануляции порошковых материалов и от технологических параметров нанесения покрытий (в том числе, расходов плазмообразующего газа, напыляемого материала и транспортирующего газа, дистанции напыления, скорости перемещения детали и плазмотрона, силы тока и напряжения на дуге, ...), предварительной подготовки восстанавливаемых поверхностей и финишной обработки покрытий.

При обосновании технологических параметров плазменное напыление рассматривалось не только как восстановительный процесс, но и как основа для оптимизации микроструктуры восстанавливаемых поверхностей с целью повышения работоспособности деталей по прочности сцепления покрытий с основой, стойкости (в зависимости от условий работы - износостойкости, коррозионной стойкости, кавитационной стойкости и т.п.) и по сопротивлению усталости. В частности адгезионная прочность напыляемых покрытий и их износостойкость оценивались с использованием традиционных методик А.Хасуя [6] на основе испытаний образцов на отрыв и машины трения МИ-1 в условиях статического нагружения узла трения, состоящего из ролика, имитирующего напыленную поверхность, и колодки из материала сопряженной детали. Для

оценки усталостной прочности покрытий использовалась лабораторная установка типа МИК Института механики АН УССР (рисунок 2). Испытаниям подвергались три серии образцов [7]: без покрытия, с покрытием по традиционной технологии с предварительной абразивноструйной обработкой образцов электрокорундом и с дополнительной обработкой плазменных покрытий ультразвуком по методике Института физики прочности и материалов СО АН СССР.

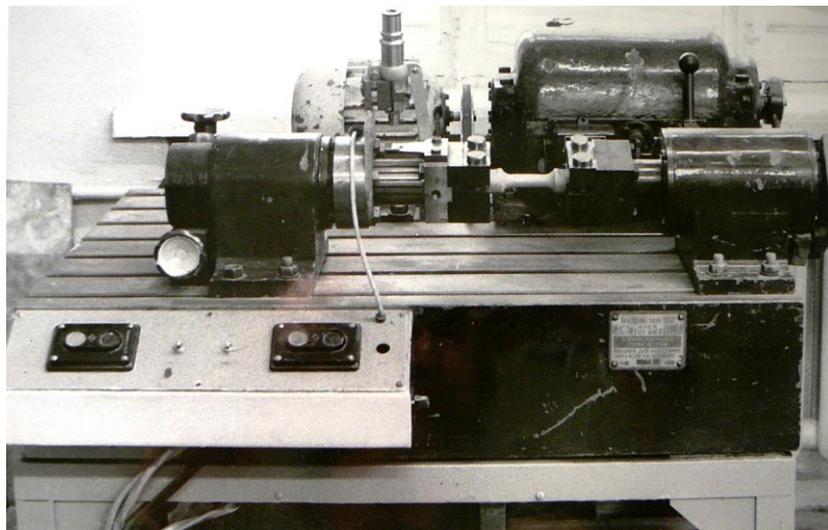


Рисунок 2. Лабораторная установка для испытания на сопротивление усталости.

В результате было установлено, что:

прочность сцепления плазменных покрытий без оплавления может достигать 40...60 МПа, что для большинства деталей судового оборудования является вполне удовлетворительной;

при оптимальном выборе напыляемых материалов износостойкость покрытий может повышаться в 2 и более раза;

снижение усталостной прочности напыленных образцов с их предварительной абразивноструйной обработкой может достигать 15% и более;

дополнительная обработка покрытий ультразвуком позволяет не только компенсировать снижение усталостной прочности образцов, вызванное плазменным напылением, но и повысить её в среднем на 7...10%.

В связи с этим логическим направлением развития плазменных технологий стал переход к напылению покрытий с одновременным воздействием на них ультразвуком (рисунок 3) и к созданию установок для реализации такой технологии (рисунок 4).

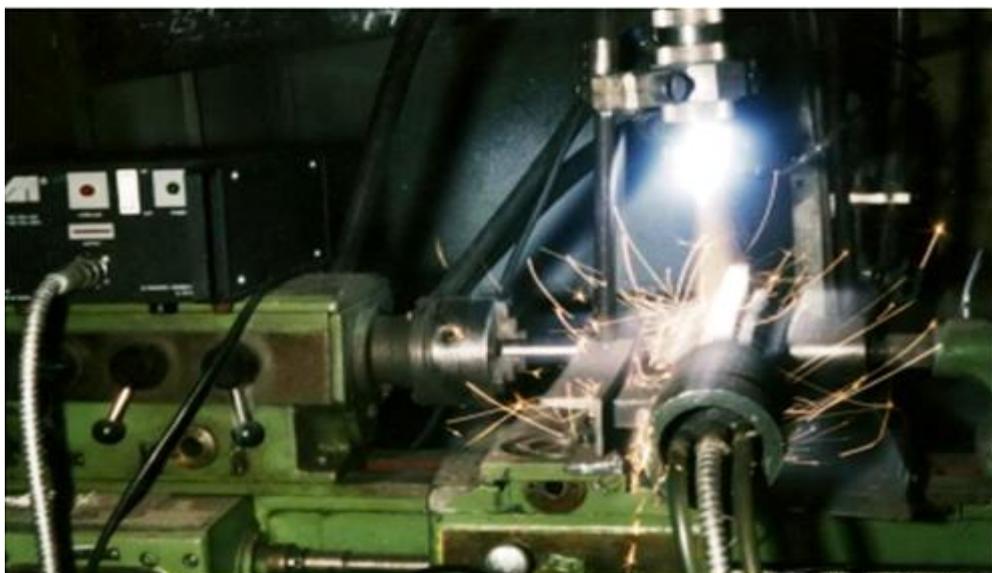


Рисунок 3. Плазменное напыление покрытий с одновременной их ультразвуковой обработкой.

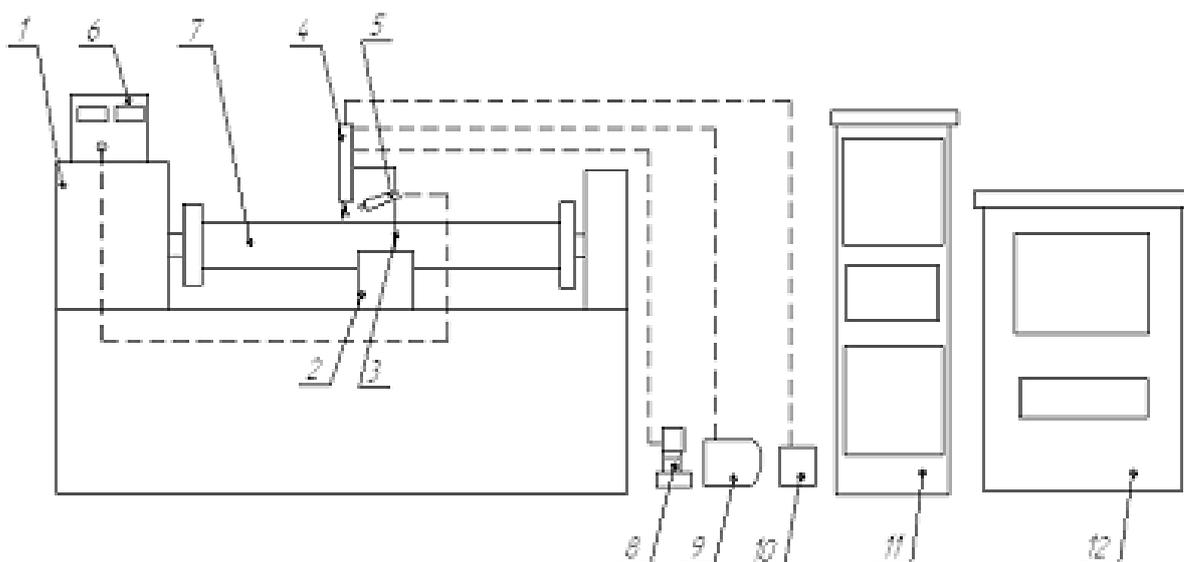


Рисунок 4. Схема установки для плазменно-ультразвуковых покрытий:  
 1 - токарный станок; 2 - резцедержатель; 3 - кронштейн; 4 - плазмотрон;  
 5 - ультразвуковой волновод; 6 - ультразвуковой генератор; 7 - деталь;  
 8 - дозатор порошка; 9 - компрессор; 10 - водяной насос; 11 - блок управления;  
 12 - источник электропитания.

Металлографические исследования показали, что при традиционном нанесении плазменных покрытий, как правило, поверхностный слой подвергается растягивающим усилиям, а при дополнительной обработке их ультразвуком формируется мелкодисперсное наноструктурированное покрытие со сжимающими напряжениями (рисунок 5). Причем, размеры мелкодисперсных частиц структуры в слое тем меньше, чем ближе ввод ультразвука к пятну плазмы, а соответственно больше и степень повышения усталостной прочности, которая может достигать 50...60%.



Рисунок 5. Структура покрытия (размер частиц 10-15 нм).

На основе выполненных исследований были определены оптимальные параметры нанесения плазменных покрытий, разработаны, согласованы с Речным Регистром РСФСР и внедрены на предприятиях отрасли более 10 технологий восстановления и упрочнения деталей судового оборудования, в том числе, и таких ответственных, работающих в весьма жестких условиях асимметрично изменяющихся динамических нагрузок, как коленчатые валы, распределительные валы и поршневые пальцы судовых дизелей [8-10]. Для таких деталей важно было учесть не только их материал, состояние поверхностей, материалы сопрягаемых деталей, но и условия и среду их работы. Так, для коленчатых валов, работающих в паре с баббитовыми подшипниками, вполне допустимо было использовать порошки нихрома марки ПХ20Н80, а -работающих с подшипниками из алюминиевого сплава АСМ, потребовались более дорогие порошковые композиции на основе молибдена или NiAl. Причем, в первом случае с точки зрения антифрикционных свойств пар трения оказалось более целесообразным использовать в качестве плазмообразующего газа смесь аргона и азота, а во втором – чистый аргон. В результате при приемлемой адгезии износостойкость подшипниковых опор повышалась более чем в 2 раза. В тех же случаях, когда прочность сцепления покрытий оказывалась недостаточной наносился подслои из порошка ПТЮ5Н, а восстановление кулачков распределительных валов и поршневых пальцев выполнялось плазменным напылением с оплавлением покрытий из порошка ПГАН-9 аргоноводородной дугой установки «Ютроник-плазма», которая (установка), как показала практика, позволяла получать более качественные покрытия и при использовании её и для их нанесения.

Накопленные знания и опыт разработки плазменных технологий позволил перейти от разработки индивидуальных технологий к типовым и групповым технологиям с использованием вычислительной техники. С этой целью был сформирован банк плазменных технологий и выполнена классификация оборудования и материалов в соответствии с кодированием восстанавливаемых поверхностей деталей по следующим признакам:

виду (причине) изнашивания по ГОСТ 23.002-78;  
форме, материалу, размерам и состоянию восстанавливаемой поверхности;

материалу сопряженной детали;

условиям работы детали (узла).

Кодирование позволило присваивать оборудованию, напыляемым материалам и восстанавливаемым поверхностям двенадцатизначный шифр, каждая пара цифр которого символизировала определенный вид того или иного признака. По этому шифру и индексу эффективности технологий определялись оптимальные режимы плазменного напыления (материалы, оборудование, рабочие газы, приемы, параметры нанесения покрытий и т.д.) и выполнялось формирование технологических процессов с помощью программы «Автоматизированное обоснование технологий восстановления деталей судового оборудования» в рамках трех модулей: подготовительного, основного и заключительного [11]. При этом параметры плазменных технологий определялись на основе принципа эквивалентного отображения, который символически записывается как

$$\Phi \Leftrightarrow T, \quad (4)$$

где  $\Phi$  – множество функциональных параметров детали, характеризующих прочность сцепления покрытий с основой, их стойкость (износостойкость, коррозионную стойкость, ...) и усталостную прочность;

$T$  - множество технологических параметров подготовительных операций, операций нанесения покрытий и финишных операций.

Суть этого принципа состоит в том, что, если в процессе эксплуатации технологические параметры закономерным образом отображаются в функциональные параметры в соответствии с прямой зависимостью  $\Phi = \Phi(K, T, \Xi)$ , (где  $K$  и  $\Xi$  – множество конструктивных параметров и эксплуатационных параметров деталей соответственно), то для обеспечения надежной работы деталей в производственных условиях функциональные параметры должны быть эквивалентно отображены в технологические в соответствии с обратной зависимостью  $T = T(\Phi, K, \Xi)$ . Однако, поскольку обратная зависимость обычно многопараметрическая, а её реализация носит многовариантный характер, то для соблюдения принципа (4) модель обоснования параметров плазменно-ультразвуковых процессов представлялась в виде оптимизационной модели, в которой в качестве целевой функции использовалась прямая зависимость, а система ограничений и граничных условий формировалась из приоритетных для той или иной детали условий обеспечения её работоспособности (адгезии и (или), стойкости и (или) сопротивления усталости).

Ниже представлены извлечения из групповой технологии восстановления деталей типа «вал» применительно к условиям Ленинградской ремонтно-эксплуатационной базы [12], где номенклатура деталей, пригодных для восстановления, насчитывала более 50 наименований и типоразмеров, в том числе валы насосов, штоки домкратов, коленчатые валы компрессоров, валы роторов и крышки электродвигателей и клинкетные задвижки. Восстанавливаемые поверхности – в основном опорно-посадочные, которые подвергались коррозионно-механическому износу.

Как уже отмечалось, технологический процесс восстановления деталей плазменным напылением формируется из трех модулей операций:

- подготовительного (подготовку оборудования, порошковых материалов и поверхностей деталей под нанесение покрытий);
- основного (выбор, настройка оптимальных параметров и нанесение плазменных покрытий);
- заключительного (финишную обработку покрытий с контролем их качества).

При выполнении этих операций обязательно должны соблюдаться требования техники безопасности и производственной санитарии, а к работе на плазменных установках допускаться лица не моложе 18 лет, специально обученные, прошедшие проверку знаний и аттестацию.

Восстановлению подлежат детали, имеющие износы опорно-посадочных поверхностей не более 1,5 мм без трещин. Глубина рисков, забоин и вмятин не должна превышать 1 мм.

Используемое оборудование и материалы должны соответствовать требованиям ГОСТ и технических условий на поставку. Подготовку оборудования следует производить согласно технической документации. Подготовка порошковых материалов состоит в их просеивании и сушке в течение 2...3 часов при температуре 100...120°С.

Подготовка деталей к восстановлению должна включать их мойку, очистку, дефектацию визуальным, размерным и магнитно-порошковым контролем, обезжиривание, механическую и абразивноструйную обработку. Мойку и очистку деталей необходимо выполнять в соответствии с техническими условиями на их ремонт. Для удаления дефектного слоя и исправления геометрической формы механическую обработку следует производить резанием или шлифованием на глубину 0,2 мм. Перед абразивноструйной обработкой восстанавливаемые поверхности необходимо обезжирить, например, ацетоном. Абразивноструйную обработку можно производить стальной или чугунной крошкой, или электрокорундом с дистанции 120...130 мм зернистостью 1,0...2,0 мм при давлении воздуха 0,4...0,5 МПа до получения матовой поверхности с ясновидимой

шероховатостью. После абразивноструйной обработки к поверхностям нельзя прикасаться руками и другими предметами.

Для согласованной номенклатуры деталей целесообразно применять следующие порошковые материалы: ПТЮ5Н ТУ14-1-3926-85, ПТЮ10Н ТУ14-1-3976-85 и ПХ20Н80 ГОСТ 13084-67.

Непосредственно перед нанесением покрытий рационально поверхности обработать плазменной струей без порошка при силе тока дуги (I) 280...300 А, напряжении (U) 40...45 В, с дистанции ( $l_n$ ) 100...120 мм при давлении (p) плазмообразующего газа 0,4...0,5 МПа, не допуская появления цветов побежалости.

Плазменное напыление следует осуществлять не позднее, чем через 30 минут после абразивноструйной обработки на следующих режимах:

плазмообразующий газ – аргон (для ПХ20Н80 70% аргона + 30% азота),  
p = 0,4...0,5 МПа, I = 400...450 А, U = 30...50 В,  $l_n$  = 100...150 мм,  
зернистость порошков 40...100 мкм.

Напыление покрытий необходимо производить в несколько проходов (с толщиной слоя за проход 0,05...0,1 мм) по винтовой линии со скоростью напыления 0,1 м/с за счет подбора частоты вращения детали и продольной подачи плазмотрона. При этом плазмотрон должен быть установлен под углом 80...90° к образующей напыляемой поверхности с наклоном плазменной струи в сторону его движения.

Контроль качества напыленных покрытий следует производить по:

внешнему виду с применением лупы 10-кратного увеличения для выявления сколов, трещин, наплывов, отслоений и т.п.;

толщине и геометрическим размерам с помощью микрометрических приборов и толщиномеров;

твердости покрытий по Роквеллу с использованием твердосплавного шарика или алмазного конуса на образцах-свидетелях;

адгезии по способу отрыва конического штифта на образцах-свидетелях.

Механическую обработку плазменных покрытий из материалов ПТЮ5Н и ПТЮ10Н следует производить резанием на режимах, применяемых при обработке сталей, а ПХ20Н80 – шлифованием алмазными или абразивными кругами со скоростью их вращения 20...30 м/с и продольной подачей 0,01...0,04 мм/об при частоте вращения деталей 50...60 об/мин.

Необходимо отметить, что за отчетный трехлетний период с использование разработанных технологий было восстановлено более 5000 деталей с подтвержденным экономическим эффектом 350 тыс. рублей в ценах 1987 года. При этом, несмотря на сложные перестроечные годы, большинство специализированных участков продолжало функционировать и

восстанавливать детали не только судового оборудования, но и сельскохозяйственной, автомобильной и бытовой техники [13].

### Литература

1. Внедрение методов порошковой металлургии при восстановлении изношенных деталей машин и механизмов (Постановление Совета Министров РСФСР от 22.01.85 года № 530): отчет о НИР по теме 2.54/06/84-805/ Руководитель Баёв А.С. Л.: ЛИВТ, 1986. № государственной регистрации 0076980.

2. Пянькин, В.П. Современные способы восстановления деталей машин/ В.П. Пянькин, В.Ф. Тренин//Обзорная информация ЦБНТИ Минречфлота РСФСР, 1985, выпуск № 3. – 29 с.

3. Кулик, А.Я. Газотермическое напыление композиционных порошков/ А.Я. Кулик, Ю.С. Борисов, А.С. Мнухин, М.Д. Никитин – Л.: Машиностроение, 1985. – 199 с.

4. Баёв, А.С. Обеспечение надежности судовых технических средств при ремонте технологическими методами: учебное пособие/ А.С.Баёв. – Л.: ЛИВТ, 1987. – 95 с.

5. Баёв, А.С. Технология восстановления деталей судовых дизелей плазменным напылением / А.С.Баёв // Технология судоремонта 1987, № 1. – С.25-28.

6. Хасуй, А. Техника напыления/ А. Хасуй. – М.: Машиностроение, 1972. – 282 с.

7. Баёв, А.С. Повышение сопротивления усталости восстановленных деталей судовых дизелей / А.С.Баёв // Судоремонт флота рыбной промышленности 1986, № 62. – С.26-27.

8. Применение плазменного напыления для восстановления коленчатых и распределительных валов судовых дизелей 6Ч27,5/36: технологическая инструкция ТИ50.031-86/ А.С.Баёв – Л.: ЛИВТ, 1986 -16 с.

9. Применение плазменного напыления для восстановления коленчатых и распределительных валов судовых дизелей 6ЧСП(Н)18/22: технологическая инструкция ТИ50.028-86/ А.С.Баёв, В.Б.Хмелевская – Л.: ЛИВТ, 1986 -17 с.

10. Применение плазменного напыления при восстановлении валов навешенных механизмов судовых дизелей 6ЧРН27,5/36: технологическая инструкция ТИ50.052-87/ А.С.Баёв, В.Б.Хмелевская – Л.: ЛИВТ, 1987 - 27 с.

11. Баёв, А.С. Модульный синтез технологий восстановления деталей судовых дизелей/ А.С. Баёв, И.О. Потапов// Двигателестроение, 1993, № 3.

12. Проведение исследований и разработка мероприятий по дальнейшему развитию и совершенствованию водного транспорта и промышленных предприятий на основе ускорения научно-технического прогресса. Оказание на-

учно-технической помощи Ленинградской РЭБ в освоении плазменного напыления: отчет о НИР по теме 85-349/ Руководитель Баёв А.С. Л.: ЛИВТ,1986. № государственной регистрации 01.86.0096437.

13. Баёв, А.С. Северо-Западное пароходство: основа компании – флот. История и перспективы. /А.С.Баёв // Морской вестник, 2002, № 4.

\* В январе 2019 года Баёву Александру Сергеевичу исполнилось 70 лет. Российская Академия Естествознания поздравляет академика Баёва А.С. с юбилеем, желает ему доброго здоровья, долгих лет и творческих успехов.

Энциклопедия «Известные ученые». URL: <http://www.famous-scientists.ru/14590/>.