

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
Институт электросварки им. Е. О. Патона

На правах рукописи

Т Ю Р И Н
Юрий Николаевич

УДК 621.793:533.9

**ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ
ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ
ПЛАЗМОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА**

05.03.06 —

технология и оборудование для сварки
и родственных процессов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Киев 1997

Митин

621.791
Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Институте электросварки
им. Е.О. Патона Национальной Академии наук Украины

Научный консультант: доктор технических наук
Официальный консультант: доктор технических наук

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00760856 (W)

Урюков Б.А.;
доктор технических наук
Харламов Ю.А.

Ведущее предприятие: Сумской институт модификации поверхности.

Защита состоится "___" _____ 1997 г. в ___ часов на заседании специализированного совета Д 50.02.01. при Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины по адресу: 252650, г. Киев-5, ГСП, ул. Боженко, 11. С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Института электросварки им. Е.О. Патона.

Отзыв на диссертацию просим направлять по указанному адресу.

Автореферат разослан "___" _____ 1997 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук

Беряудский В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Современное машиностроение, металлургическое, инструментальное и текстильное производство, деревообрабатывающая, сельскохозяйственные и добывающие отрасли промышленности невозможны без широкого использования легированных сталей и твердых сплавов.

Поверхностное модифицирование изнашиваемых поверхностей различного инструмента и деталей машин, изготовленных из углеродистых сталей, позволяет экономить легирующие элементы, что делает актуальными разработки с использованием упрочняющих высокоэнергетических технологий.

В настоящее время почти треть всех публикаций по упрочнению металлических изделий посвящены исследованию износостойкости, усталостной прочности, коррозионной стойкости и других свойств изделий, которые они приобретают после поверхностной высокоэнергетической обработки лазером, электронным лучом, плазмой взрыва и другими методами.

Исследования показывают, что плазменная обработка позволяет модифицировать поверхность при сохранении объемных свойств изделия. При этом повышается усталостная прочность (до 40%), коррозионная стойкость (до 200%), износостойкость (до 1000%) и теплостойкость (до 200%).

Использование плазменных технологий позволяет в широких пределах осуществлять изменение скорости нагрева и охлаждения поверхности изделия, толщины, локальности площади и конфигурации модифицированного слоя. Технологии и устройства для плазменной обработки просты в управлении и дают возможность упрочнять изделия при полной автоматизации процесса обработки.

В диссертационной работе представлены результаты исследования изделий с модифицированными рабочими поверхностями, технологических устройств и плазменных технологий, где инициирование электрического разряда осуществляется продуктами детонационного сгорания горючих газовых смесей (плазменно-детонационные технологии - ПДТ); при кратковременном контакте поверхности упрочняемого изделия и электродов из легирующих элементов (электро-фрикционные технологии - ЭФТ); а также

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

продуктами электролиза электролитов на водной основе между жидким электродом и упрочняемой поверхностью изделия (электролитно-плазменные технологии-ЭПТ).

Эти методы мало изучены и в литературе нет данных о технологических режимах, конструкциях и особенностях эксплуатации плазменно-детонационных, электролитно-плазменных и электрофрикционных установок.

Цель работы. Целью работы является создание научно-технических основ и эффективных методов поверхностного модифицирования изделий плазмой несамостоятельного электрического разряда, разработка и внедрение в производство ресурсосберегающих технологий и оборудования.

Для выполнения поставленной цели сформулированы задачи:

- разработать методы и устройства для формирования импульсных плазменных струй, образующихся при инициировании электрического разряда в продуктах детонационного сгорания горючих газовых смесей;
- исследовать электрический разряд между поверхностью изделия и жидким электродом из щелочных электролитов на водной основе, и создать технологии и устройства для плазменной закалки;
- разработать метод и технологии модифицирования изделий в среде охлаждающей жидкости, плазмой электрической дуги между электродом и упрочняемой поверхностью (легирующие элементы вводят в состав электрода или жидкости);
- сформулировать математическую модель процесса нестационарного детонационного сгорания горючих газовых смесей в электрическом поле и на основе ее решения разработать методики расчёта генераторов плазмы;
- исследовать высокоэнергетические плазменные струи, скорость, температуру, плотность и состав;
- исследовать эффективность воздействия плазмы и электрического тока, проходящего по плазменной струе, на поверхность твердого тела, изменение текстуры, структурного и фазового состава поверхности изделия;
- провести стечдовые и промышленные испытания, триботехнические исследования и апробацию разработанных технологий в промышленности;
- разработать комплекс ресурсосберегающих технологий и технологического оборудования, осуществить их внедрение.

Основные положения выносимые на защиту:

- методы и устройства для формирования импульсных плазменных струй, образующихся при инициировании электрического разряда в продуктах детонационного сгорания горючих газовых смесей;

- результаты исследования технологии модифицирования изделий с вводом легирующих элементов в плазму в виде порошков, компактных тел и газов;

- технологии и устройства для плазменного модифицирования энергией электрического разряда между поверхностью изделия и жидким электродом из щелочных электролитов на водной основе при одновременном вводе легирующих элементов в виде порошков или компактных электродов;

- методы и технологии модифицирования изделий в среде охлаждающей жидкости, плазмой электрической дуги между твердым электродом и упрочняемой поверхностью (легирующие элементы вводят в состав электрода или жидкости);

- математическая модель нестационарного процесса детонационного сгорания горючих газовых смесей в электрическом поле между поверхностями электродов в коаксиальных плазматронах, обеспечивающая расчет и оптимизацию конструкций генераторов плазменных струй в диапазоне температур 2000-30000 К, скоростей до 8 км/с при времени воздействия на изделие до 5×10^{-3} с;

- механизм взаимодействия плазмы с поверхностью изделия в среде газа и охлаждающей жидкости при плотностях электрического тока $10^2 \dots 10^5$ А/см², методы и устройства для генерирования плазменных струй с плотностью мощности от 10^3 до 10^7 Вт/см²;

- результаты металлографических исследований, эталонных и промышленных испытаний изделий с модифицированными слоями, толщиной от 0,01 до 10 мм и имеющими твердость 8-20 ГПа;

- промышленные технологии плазменно-детонационной, электролитно-плазменной и электрофрикционной обработки поверхности инструмента и деталей машины в металлургической, машиностроительной, мебельной, деревообрабатывающей, горно-шахтной, сельскохозяйственной и других отраслях промышленности, повышающие их работоспособность в 3...5 раз.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработаны методы и устройства для формирования импульсных плазменных струй, образующихся при иницировании электрического разряда в продуктах детонационного сгорания горючих газовых смесей;

- проведены исследования технологии импульсно-плазменного (И/П) модифицирования изделий и разработаны эффективные методы ввода легирующих элементов в плазму в виде порошков, компактных тел и газов;

- созданы технологии и устройства для модифицирования изделий электрическими разрядами между упрямимой поверхностью и жидким электродом из щелочных электролитов на водной основе, показано, что в изделиях из сплавов с содержанием углерода 0,3-0,6 %, после нагрева при плотности мощности электрической энергии 10^2-10^4 Вт/см², образуются локальные включения твердостью от 50 до 67 HRC, толщиной до 10 мм;

- показано, что использование электрического дугового разряда в охлаждающей жидкости между трущимися поверхностями электрода-анода и изделия-катода обеспечивает легирование в расплаве поверхности изделия элементами, содержащимися в электроде. При легировании бором твердость модифицированного слоя 11-17 ГПа, толщина 0,5-4 мм;

- проведено математическое моделирование нестационарного процесса детонационного сгорания горючих газовых смесей в электрическом поле между поверхностями электрода в коаксиальных плазматронах, что позволило разработать методики расчета импульсных плазматронов, которые используются для поверхностного термического упрочнения, химико-термической обработки, микрошлавки и газотермического насыщения;

- при импульсно-плазменной обработке реализован эффект аномальной диффузии элементов в зоне соударения плазменной струи с поверхностью. Ее составляющие (вольфрам, азот, титан и т.д.) обнаружены на глубине до 40 мкм;

- обосновано применение разрушаемых электродов и методов электромагнитного фокусирования, что изменяет состав плазмы и ее плотность мощности в пределах 10^3-10^7 Вт/см²;

- обнаружено, что на поверхности изделий из сплавов с содержанием углерода 0,5-1,0% после обработки импульсной плазмой, имеющей в своем

составе металлы с большим атомным весом и высокую плотность мощности (10^4 - 10^7 Вт/см²), образуются твердые (10-20 ГПа) слои толщиной 10...150 мкм;

• на основе исследования порошковых твердых сплавов после обработки импульсной плазмой, имеющей плотность мощности 10^3 - 10^4 Вт/см², обнаружены упрочняющие фазы в виде мелко-дисперсных карбидов, полукарбидов вольфрама, соединений кобальтовой связки продуктами распада карбидов и металлическими составляющими плазмы;

• новизна созданных и внедренных способов, устройств и технологии подтверждена 60-ю авторскими свидетельствами и патентами.

Практическая ценность и реализация результатов работ. Разработаны технологии и оборудование для поверхностного модифицирования изделий, имеющих цилиндрическую, плоскую, коническую и сферическую конфигурацию. На этих поверхностях получены слои твердостью 10-20 ГПа при толщине слоя от 0,01 до 10 мм.

Электролитно-плазменная технология была апробирована в металлургической промышленности при упрочнении пил, ножей для резки проката, роликов в установках для непрерывной разливки стали; в деревообрабатывающей промышленности при упрочнении футеровки и контрбруса; в угольном машиностроении при закалке деталей скребкового конвейера, сит углеобогащительных машин, резцедержателей проходческого комбайна; в сельхозмашиностроении для закалки дисков свеклоуборочного комбайна, борон, сеялок и т.д.

Электро-фрикционная технология эффективна для упрочнения резцов и пил отбойных молотков в угольной промышленности, а также при создании износостойкого слоя на режущих поверхностях сошников, плугов, плоскорезов и т.д. в сельском хозяйстве.

Плазменно-детонационная технология была реализована в металлургической, машиностроительной, деревообрабатывающей и перерабатывающих отраслях промышленности для упрочнения фрез, протяжек, резцов, метчиков, циркулярных и рамных пил, пил из сплава ВК-15, а также поршневых колец двигателя, клапанов и седел гидрораспределителей, траверс гидромотора, поршня насоса, колец торцевых уплотнений, ножей для резки труб, проволоки, картона, твердосплавных фильер, пил для резки труб и т.д.

Промышленные испытания показали, что разработанные технологии повысили работоспособность изделий в 2-8 раз (см. таблицу).

Личное участие автора в получении научных результатов, приведенных в диссертации, заключается:

- в разработке способов и устройств для формирования технологической плазмы от самостоятельного электрического разряда в продуктах детонационного сгорания горючих газовых смесей, в продуктах электролиза электролита на водной основе и в охлаждающей жидкости между поверхностями электрода и изделия;

- в формулировке и решении математических моделей, расчете плазменных генераторов, оптимизации энергетических характеристик плазменных струй в диапазоне температур 10000-30000 К и скоростей до 8 км/с;

- в проведении и обобщении результатов исследования плазмы, методов управления электрическим разрядом при её образовании и механизма взаимодействия ее с твердой поверхностью изделия;

- в анализе результатов исследования модифицированных поверхностей, разработке методик и рекомендаций по выбору технологических режимов упрочняющей обработки изделий, работающих в различных эксплуатационных условиях;

- в разработке и внедрении промышленных технологий и оборудования для упрочняющей плазменной обработки инструмента и деталей машин.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на 7-и международных и 30-ти всесоюзных и республиканских конференциях и симпозиумах.

Основные из них: Усint symposium "Electron beam and thermal spraying processes for production of materials and coatings". Kiev, 1990; "Прогрессивные технологии производства, структура и свойства порошковых изделий, композиционных материалов и покрытий", Волгоград, 1991(92); "Теория и практика газотермического нанесения покрытий", Дмитров, 1991(92,93); "Плазмотехнология-91(93)", Запорожье, 1991(93); "Новые процессы и оборудование для нанесения покрытий", Симферополь, 1991(92,93); "Применение высокоэффективных процессов сварки", НТЦ "Информатика",

Суздаль, 1992; "Нетрадиционные и лазерные технологии", АЛТ-92, Москва, 1992 г.; Thermal Spray: International Advances in Coating Technology. Orlando, USA, 1992; "Состояние и перспективы восстановления и упрочнения деталей машин", Москва, 1994; "Физика и техника плазмы", Минск, 1994; Second International conference MPSL'96. Sumy. 1996.; First Tri-Service Workshop Review on private R&D in TSU. 21.08.96. Moscow, Russia и другие.

Материалы диссертации опубликованы в 112 научных трудах, из них 60 авторских свидетельств и патентов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из 8 глав, содержит 250 страниц текста, 26 таблиц, 200 рисунков, список литературы из 499 наименований и приложений на 23 листах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Анализ результатов исследовательских работ, отечественного и зарубежного опыта применения плазменных технологий для поверхностного термоупрочнения и модифицирования различных изделий показал, что с этой целью применяется плазма, имеющая следующие параметры: энергия 300...10000 Дж; частота 1...10 Гц; длительность 10^2 - 10^3 с; скорость 50...9000 м/с; температура 2000...30000 К. (рис.1).

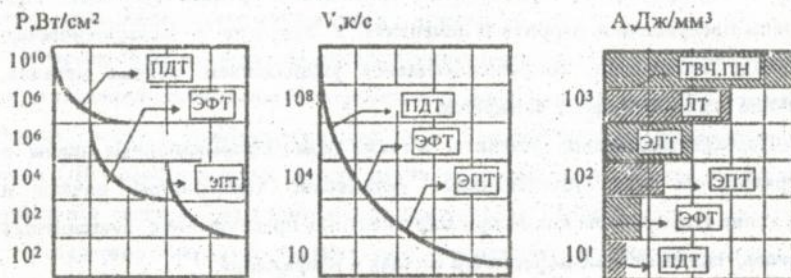


Рис.1. Зависимости: а) плотности мощности-Р от времени воздействия τ -т плазменной струи; б) скорости нагрева поверхности-V от величины упрочненного слоя- δ ; в) затрат энергии-А на нагрев единичного объема поверхности при установленной мощности оборудования-W.

Этим требованиям удовлетворяют разработанные нами технологии, основанные на использовании методов образования плазмы от несамостоятельного электрического разряда: плазменно-детонационные (ПДТ), электролитно-плазменные (ЭПТ) и электрофрикционные технологии

(ЭФТ) (см. рис.1.а,б).

При упрочнении изделий наиболее затратными технологическими методами обработки (рис.1.в) являются: нагрев токами высокой частоты (ТВЧ), печной нагрев (ПН), лазерные технологии (ЛТ), электронно-лучевые (ЭЛ) и менее затратными: плазменно-детонационные (ПДТ), электролитно-плазменные (ЭПТ) и электрофрикционные (ЭФТ).

В диссертационной работе оценку величины нагретого плазмой слоя изделия проводили по формулам, разработанным на основе известных теоретических закономерностей температуропроводности. При этом принималось, что теплопередача осуществляется преимущественно по электронному механизму.

При циклическом нагреве, нестационарное температурное поле в тонком поверхностном слое твердого тела образует термоупругие акустические волны, которые вызывают колебание системы с амплитудой, рассчитываемой через W - энергию импульса плазменного потока, c - скорость света, k - коэффициент отражения энергии, ω - частоту колебания и M - массу упрочняемого тела. При этом в упрочняемом слое изделия периодически возникают напряжения сжатия, которые растут до момента достижения предела текучести. При фазовом превращении феррита и цементита в аустенит в межкритическом интервале температур, сопровождающемся уменьшением объема металла, величина этих напряжений снижается.

Перекристаллизация аустенита, а также термомодеформационные процессы в поверхностном слое обуславливают повышение температуры начала и понижение температуры конца при мартенситных превращениях аустенитных участков, снижают неоднородность состава и напряжения.

Температура нагрева поверхности изделия может быть рассчитана по формуле:

$$T = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{(1 - \lambda) \rho l}{m a c_s \tau_a}}, \quad (1)$$

где α - температуропроводность; λ - теплопроводность; c_s - теплоемкость; ρ - плотность материала твердого тела; τ_a - время обработки; l - расстояние, на которое в рассматриваемом материале распространяется тепловой фронт; m - масса плазменного потока. По этой же формуле можно оценивать величину

допустимого теплового потока с позиции обеспечения структурных преобразований в нагреваемой поверхности и учитывая Q - избыточный тепловой поток, $Q = 1/x_{зак} \lambda (T_1 - T_2)$, T_1 - температуру плавления материала изделия, T_2 - температуру структурных преобразований (закалки), $x_{зак}$ - толщину закаленного слоя

Для расчета скорости нагрева поверхности можно использовать формулу:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{d}{dt} \{T(0, \tau_0)\} = \frac{q_1}{\sqrt{\pi}} \lambda \sqrt{\frac{a}{\tau_0}} = 1,13 \cdot 10^7 \text{ (град/с)}, \quad (2)$$

где q_1 - удельный тепловой поток, а τ_0 - время обработки характерные для плазменно-детонационной технологии. При длительности взаимодействия плазменного потока с поверхностью 10^{-3} - 10^{-5} с эта формула достаточно точно отражает действительность.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что при частоте импульсов плазмы свыше 4 Гц сохраняются высокие градиенты температур при нагреве и охлаждении. При этом можно получать достаточно большие по толщине упроченные слои (50..150 мкм). После окончания воздействия плазменных импульсов, происходит выравнивание температуры в поверхностном слое и затем охлаждение за счет отвода тепла в изделие.

Формировать импульсные высокоэнергетические плазменные струи можно при реализации нестационарных режимов детонационного сгорания горючих газовых смесей в электромагнитном поле. Распространение детонационной волны (ДВ) осуществляется между двумя коаксиальными телами вращения, служащими электродами в импульсном плазматроне (рис.2).

Вследствие большой температуры происходит частичная ионизация продуктов сгорания и при наличии внешнего электромагнитного поля по газовому слою за ДВ течет электрический ток, возникает дополнительная подперемаяющая сила и добавочный приток энергии к газу за счет джоулевой диссипации, что существенно увеличивает энергию ударной волны и продуктов сгорания.

При математическом моделировании нестационарного детонационного процесса сгорания, активированного электромагнитным полем, вводим усредненные по ширине межэлектродного зазора параметры по формуле:

$$\langle X \rangle = \frac{1}{h} \int_0^h X dh, \quad (3)$$

где X принимает значения B, E, j, v, \dots ; h - ширина кольцевого зазора.

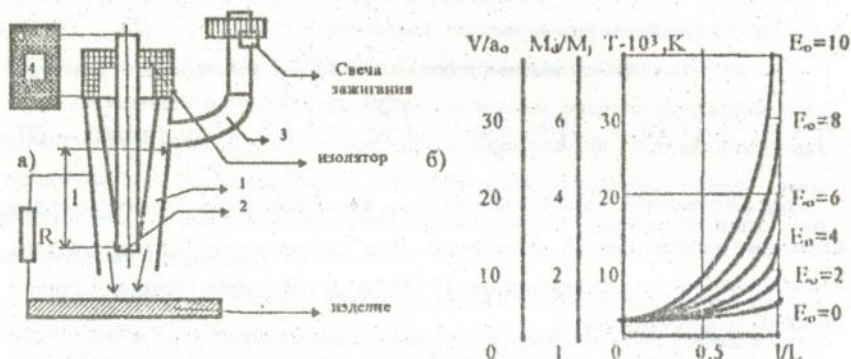


Рис.2. Формирование импульсных плазменных струй в плазменно-детонационных генераторах: а)-схема устройства, 1-реакционная камера, 2-расходоуемый электрод, 3-детонационное устройство, 4-высоковольтный источник питания; б)-распределение температуры T , увеличение проводимости V/a_0 , скорости M_D/M_1 плазменной струи по длине реакционной камеры X/L при напряженности электрического поля $-E$.

Интегрирование (3) ведется по нормали к поверхности электродов, одинаковой для внутренней и внешней стенки канала. Получаемые параметры зависят лишь от времени и расстояния вдоль образующей до места инициирования ДВ.

В гидравлическом приближении в качестве соотношений на ДВ используем уравнение, полагая в них $M_D = D/a_0 = (dl_D/dt)/a_0$. Для расчета параметров на ДВ, как функции пройденного ею расстояния l , применим метод Уизема, согласно которому число Маха волны детонации $M_D = M_D(l)$ является решением дифференциального уравнения, получающегося после подставления в уравнение на акустической характеристике c^* , догоняющей ДВ и газодинамических параметров на ДВ, выраженных через M_D . Комбинируя уравнения газодинамической подсистемы получим соотношение на c^* характеристике:

$$\frac{dp}{dl} + \rho a \frac{dw}{dl} = \frac{j_h}{w+a} \left(\frac{\gamma-1}{\sigma} j_h + \frac{a}{c} B \right) - \frac{\gamma \rho w}{w+a} \frac{1}{A} \frac{dA}{dl}. \quad (4)$$

$$(w + a) \frac{d}{dl} = \frac{\partial}{\partial t} + (w + a) \frac{\partial}{\partial l} \quad (5)$$

В уравнение подставляются следующие значения $B=0$, $j_n = \sigma E_0$.

где E_0 - усредненный вектор напряженности электрического поля, равный разности потенциалов на электродах, деленный на величину кольцевого зазора.

Вместо M_D и l введем новые безразмерные величины Z и ξ по формулам:

$$Z = \sqrt{1 - M^2} / M_0; \quad (6) \quad \xi = \frac{l}{L}; \quad (7) \quad D = \frac{a_0 M_0}{\sqrt{(1 - Z^2)}}; \quad (8)$$

$$P = \frac{P_0 M_0^2 \gamma}{(\gamma + 1)(1 - Z)}; \quad (9) \quad \rho = \frac{\rho_0 (\gamma + 1)}{(\gamma - Z)}; \quad (10)$$

$$U = \frac{M_0 a_0}{\gamma + 1} \sqrt{\frac{1+z}{1-z}}; \quad (11) \quad a = \frac{M_0 a_0}{\gamma - 1} \sqrt{\frac{\gamma(\gamma - z)}{(1 - z)}}. \quad (12)$$

Функция $Z(\xi)$ определяется из дифференциального уравнения

$$\left(1 + \sqrt{\frac{\gamma}{(\gamma - z)(1 + z)}}\right) \left(1 + z + \sqrt{\gamma(\gamma - z)(1 + z)}\right) \frac{dz}{d\xi} = k(1 - z)^2 \sqrt{1 - z^2} - \gamma(1 - z^2) \frac{1}{A} \frac{dA}{d\xi}$$

$$\text{здесь } k = \frac{\delta E_0^2 (\gamma - 1)(\gamma + 1)^2 L}{\gamma \alpha_0 \rho_0 M_0^3}, \quad (13), \quad \text{а } \delta = c \frac{(kT)^{3/2}}{e^2 \ln \Delta \sqrt{8\pi m_e}}, \quad (14)$$

которое интегрируется в элементарных функциях, представляя решение $Z(\xi)$ в неявной форме.

При расчетах пренебрегали переменностью $\ln \Delta$, считая $\ln \Delta = 10$,

$$k = k_0 (\gamma - z)^{3/2} / (1 - z)^{3/2}. \quad (15)$$

В случае $dA/d\xi = 0$ k является параметром масштабного подобия. Численное интегрирование обыкновенного дифференциального уравнения, при заданных начальных условиях $Z(0) = 0$, где $\gamma = 1,2$ - показатель адиабаты продуктов сгорания; $M_0 = 5,0$ - число Маха стационарной детонационной волны; $\rho = 1 \text{ кг/м}^3$ - начальная плотность продуктов сгорания; $E_0 = 8 \text{ в/м}$ - напряженность электрического поля в кольцевом зазоре плазматрона.

Результаты численного интегрирования обыкновенного дифференциального уравнения при заданных начальных условиях $Z(0) = 0$

показали, что при увеличении E_c в разгон ДВ включается второй фактор-подвод Джоулева тепла. При этом разгон волны сопровождается ростом температуры, что в свою очередь приводит к увеличению скорости и плотности плазменного потока.

Проведенные исследования позволили создать программное обеспечение для компьютерного моделирования импульсных плазматронов. Моделирование показало, что в зависимости от длины, угла конусности и величины зазора реакционной камеры плазматрона можно в широких пределах изменять температуру, скорость и плотность импульсной плазменной струи.

Электролитно-плазменные процессы исследовались на установке (рис.3), где упрочняемая поверхность изделия нагревалась электрическим током проходящим через электролит и слой плазмы, разделяющий электролит и твердую поверхность.

При включении электродов в электрическую цепь через электролит проходит ток замыкания $-J_2$, который можно рассчитать через ЭДС электрического источника, R -сопротивление электролитной ячейки, L -индуктивность электрической цепи и τ - время существования электрической цепи.

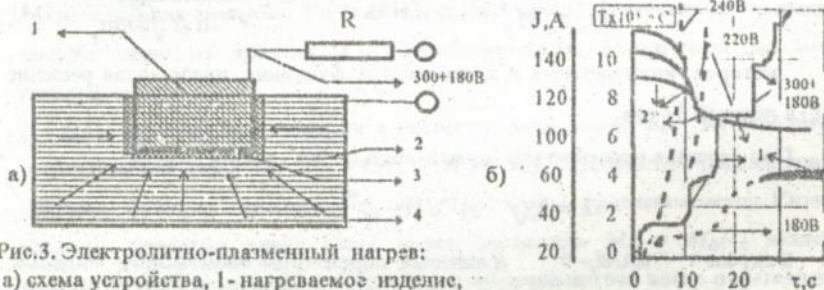


Рис.3. Электролитно-плазменный нагрев: а) схема устройства, 1- нагреваемое изделие, 2-электролит на водной основе, 3-парогазовый слой, 4-корпус электролитной ячейки (анод); б) зависимость температуры поверхности $T(1)$ и тока $J(2)$ от времени нагрева τ при различных электрических напряжениях.

При разных площадях поверхностей электродов происходит перенапряжение электролита и на катоде выделяется тепло, что в итоге приводит к вскипанию электролита и созданию парогазового слоя с повышенным сопротивлением, который перегревается, переходит в плазменное состояние и служит проводником электрического тока, осуществляя нагрев

поверхности изделия. При этом сопротивление ячейки определяется с учетом r_k, r_a - радиусов катода и анода, h - расстояния между электродами и φ_3, φ_n - удельной электропроводности электролита и плазмы.

Плотность тока зависит от электросопротивления прилегающего к изделию слоя плазмы и нагретого слоя изделия. Используя закономерности изменения температуры металлического изделия от времени и глубины исследуемого слоя, проведен анализ стадий электролитно-плазменного нагрева металлических изделий без оплавления поверхности.

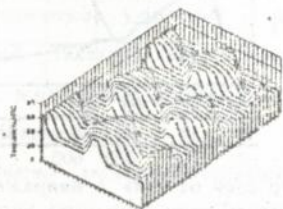


Рис. 4. Распределение твердости в поверхностном слое изделия после упрочнения ЭПЗ

В зависимости от режимов обработки и состава электролита возможно получить катодный нагрев изделия под закалку, микродуговое окислирование сплавов из металлов вентильного типа и анодную химико-термическую обработку изделий. Нагрев до температуры фазовых превращений локальных участков поверхности и охлаждение их позволяет создать изделие, имеющее на изнашиваемой поверхности систему твердых включений, рис.4, которые и воспринимают на себя нагрузку по износу. Твердые включения создают сжимающие напряжения в поверхности изделия, что на 30-40% повышает сопротивление изгибу.

В зависимости от режимов обработки и состава электролита возможно получить катодный нагрев изделия под закалку, микродуговое окислирование сплавов из металлов вентильного типа и анодную химико-термическую обработку изделий.

Третьим методом упрочнения поверхности изделия плазмой самостоятельного электрического разряда является (ЭФТ).

Электро-фрикционные технологии обеспечивают более высокую плотность энергии, чем электролитно-плазменные. Управление процессом формирования плазмы осуществляется образованием и разрывом электрического контакта между упрочняемой поверхностью изделия и электродом под слоем охлаждающей жидкости (рис. 5).

При движении электронов от катода к аноду происходит ряд столкновений,

которые приводят к значительному повышению температуры и росту тока проводимости. При увеличении межэлектродного зазора и охлаждении плазмы электрической дуги жидкостью, она теряет свою электропроводность и электрический контакт разывается.



Рис. 5. Электро-фрикционное упрочнение: а) схема устройства, 1-упрочняемое изделие, 2-электрод, 3-охлаждающая жидкость;

б) зависимость толщины δ упрочненного слоя от тока J , напряженности электрического поля U и контактного давления p .

Выделяющаяся мощность на упрочняемом изделии-катоде можно определить через U_k - катодное падение потенциала, A_2 - работу выхода электронов, J_D - ток дуги.

Ток электрического разряда создает собственное магнитное поле, которое осуществляет магнитное сжатие столба плазмы (пинч-эффект), что повышает плотность тока и линейную напряженность электрического поля. Подводимая к электрической дуге энергия рассеивается за счет теплопроводности, конвекции и излучения. Уравнение баланса энергии для единицы объема столба электрической дуги записывается с учетом d_i - диаметра единичного участка столба дуги, v_D - скорости плазмы дуги, λ - коэффициента теплопроводности, ρ - плотности, c_r - теплоемкости, v - скорости среды, T - температуры, S - площади поперечного сечения столба дуги.

Для ограничения термического влияния дуги на поверхность изделия, в электрическую цепь последовательно с источником электрического питания, включают дополнительное (балластное) сопротивление.

Для экспериментальных исследований были разработаны специализированные методики и стенды. Динамика пламенных струй исследовалась на стенде, который был оснащен скоростной кинокамерой СКС-1М, малогабаритным дифракционным спектрографом, дифракционной

приставкой к фоторегистрирующему устройству ВФУ-1. Температура плазмы определялась из продольных и поперечных спектров по относительной интенсивности линий Fe, а концентрация электронов в плазменной струе определялась по полуширине линий H.

Исследование модифицированной поверхности проводилось на сканирующем электронном микроскопе Т-20, Оже-спектрометре JAMP-10S фирмы JEOL, рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М и оптическом микроскопе NIOFOT.

Физическое уширение определялось методом аппроксимирующих функций. Текстура характеризовалась соотношением интенсивности разных линий, в отдельных случаях были проведены съемки прямых полюсных фигур на приставке ГП-2.

Результаты экспериментальных исследований электрического разряда в продуктах детонационного сгорания горючих газовых смесей показали, что в начальный момент электрический ток идет через ионизированный при взрыве газ. Через несколько десятков микросекунд появляются плазменные струи, которые движутся со скоростью до 8 км/с. За время 10^{-5} с эти струи догоняют фронт движения токового слоя и тормозятся на нем.

Наличие в потоке плазмы периодической структуры позволяет провести оценку ее параметров. Определили, что температура плазменных струй достигает 30000 К, а их скорость 8 км/с. На фоторазвертках заметно проявляются ударно-сжатые области и периодическая структура, образующаяся волнами сжатия и расширения. Струя плазмы в зависимости от геометрических параметров выходного сопла и электрода имеет поперечное сечение от 8 до 40 мм и плотность мощности от 10^3 до 10^7 Вт/см².

Исследование электролитно-плазменной технологии показало, что в парогазовом слое между поверхностью изделия и электролитом на водной основе в зависимости от величины электрического потенциала образуются микродуговые разряды. На поверхности формируется парогазовый слой, который преобразуется в постоянный плазменный слой.

Изменяя плотность и мощность микродуговых разрядов в плазменном слое путем изменения напряженности электрического поля, можно управлять температурой плазменного слоя и, соответственно, скоростью нагрева и охлаждения поверхности изделия.

Исследования взаимодействия плазменных струй с твердой поверхностью показали, что высокая ее плотность и возможность ввода в нее легирующих элементов в виде ионов, пара или мелких капель обуславливает возможность твердофазного или жидкофазного легирования поверхности изделия, химико-термической обработки, плазмо-химического синтеза и осаждения покрытий.

Легирование изделий из пористых материалов, например, спеченного железографитового сплава показало, что на поверхности формируется плотное покрытие (пористость < 1%) из материала электрода. Толщина покрытия 20...200 мкм. Микротвердость этого покрытия 2100...8000 МПа. Глубина проникновения металла (капельной компоненты составляющей плазму) в основу по открытым порам и границам зерен достигает 35 мкм. Величина термического влияния на поверхность изделия составляет 50...150 мкм, термоупрочнение характеризуется значительно большей микротвердостью (4700...8000 МПа) по сравнению с основой (1500...2500 МПа).

Плазменно-детонационное легирование (ПДЛ) сплавов на основе железа - медью, алюминием, титаном, вольфрамом, молибденом, хромом и газами - кислородом, углеродом и азотом позволяет получить на поверхности изделия слой толщиной до 100 мкм. Этот слой качественно отличается от основы и состоит из легирующего металла, его оксидов, интерметаллических (полиметаллических) соединений и α -Fe, FeO.

Микрорентгеноспектральный анализ сплавов на основе железа показал, что при легировании плазменными струями можно получить слой толщиной до 30 мкм с равномерным распределением легирующих элементов в пределах до 20%. Это достигается расплавлением поверхности изделия и перемешиванием расплава с составляющими плазменной струи.

Легирующие элементы вводятся в реакционную камеру в виде твердого тела (прутка, проволоки) и газа (азота, пропана и т.д.). Термические перенапряжения на конце стержня из легирующих материалов приводят к образованию слоя в метастабильном состоянии, взрывного характера разрушения этого слоя, сопровождающегося диспергированием на мелкие капли и перемешиванию с составляющими плазмы.

Экспериментальные работы показали, что зона термического влияния при увеличении числа плазменных импульсов растет. Фазовый состав покрытия: легирующий металл, Fe₃O₄, FeO, α -Fe, оксиды, нитриды, карбиды

легирующего металла. Из-за термического влияния, на глубине около 100-150 мкм от поверхности образца наблюдается рост зерна. Легированный слой может иметь микротвердость, которая достигает 20 ГПа (рис.6) при микротвердости основы 2-6 ГПа.

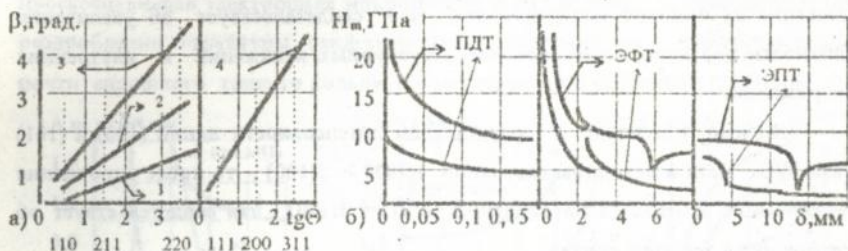


Рис.6. Результаты исследования упрочненных поверхностей: а) уширенные рентгеновских дифракционных линий стали 40Х: 1-неупрочненной; 2-после ПДТ (2 имп.), 3-после ПДТ (5 имп.), 4-после ПДТ (5 имп.) с оплавлением; б) зависимость микротвердости слоя поверхности изделия от его толщины после упрочнения различными методами.

При термоупрочнении изделий из користых материалов, например, из железуграфитового порошкового сплава образуется более толстый слой зоны термического влияния, чем на стали. Например, на поверхности изделия из железуграфита слой вторичной закалки при длительности импульсов плазмы 5 x 10⁻³с и количестве импульсов 3...5 достигает 300 мкм, из чугуна -200 мкм и из стали - 100 мкм.

При плазменно-детонационной обработке чугуна толщина упрочненного слоя увеличивается с ростом мощности и количестве импульсов.

Оже-спектроскопические исследования образцов из чугуна показали, что в зависимости от состава используемого электрода на поверхности изделия формируется слой, содержащий молибден, вольфрам, хром, титан, углерод, железо, кислород и другие легирующие элементы. В глубине, под упрочненным слоем, имеется также молибден и углерод. пик которых доминируют даже над линиями железа. Структура расплавленного слоя чугуна-мелкокристаллическая игольчатая, характеризуется наличием нерастворенных мелких глобул материала электрода

На снимке, сделанном в сканирующем электронном микроскопе, слой чугуна модифицированного составляющими плазмы представляет собой практически другой сплав, который, повторяя рельеф поверхности основы,

заплавляет поверхностные дефекты. Микротвердость в слое на глубине 80-100 мкм составляет 10-14 ГПа.

В твердых сплавах на основе карбида вольфрама после упрочнения наблюдается развитие дифракционных линий, соответствующих фазе WC, и снижение их пиковой интенсивности, что свидетельствует об увеличении плотности дефектов, возникновении структурных искажений и внутренних напряжений.

Отмечено изменение в соотношении интенсивности линий (100) и (101) фазы WC. Если в исходном состоянии $I(101) > I(100)$, то после упрочнения соотношение изменяется на обратное: $I(101) < I(100)$, что свидетельствует об изменениях в текстуре сплава.

Наиболее существенное отличие заключается в появлении составляющих тройной фазы Co_6W_6C , которая является результатом диффузионного взаимодействия и растворения карбида вольфрама в кобальтовой матрице.

Рентгенографически установлено образование также фазы Co_2W_4C . Линии этой фазы на дифрактограмме четкие, их интенсивность того же порядка, что и линии WC-фазы.

Электролитно-плазменная закалка поверхности изделия обуславливает образование мелкодисперсной структуры, состоящей из бесструктурного мартенсита твердостью 5-8 ГПа и бейнита, имеющего твердость 2,2-2,8 ГПа. Глубина упрочненного слоя в зависимости от режимов обработки может быть от 0,5 до 10 мм (см. рис. 6.а).

Электро-фрикционное упрочнение (борирование в расплаве) осуществляется электродами из чугуна с добавками в межэлектродный зазор карбида бора. Типичная микроструктура упрочненного слоя состоит из поверхностного слоя твердостью 15-20 ГПа, слоя быстрозакаленной стали твердостью 9-11 ГПа и закаленного слоя (слоя вторичной закалки) твердостью 7-9 ГПа (см. рис. 6.б).

Триботехнические исследования показали, что ПДУ наиболее эффективно для изделий, работающих без смазки или в жидкости, имеющей низкую вязкость. При этом износ поверхности в 4...6 раз ниже, чем у изделий после закалки по стандартной технологии (рис.7).

Анализ результатов сравнительных триботехнических испытаний чугунных образцов показал, что при трении без смазки максимальный износ имеют неупрочненные образцы. Хромирование, нанесение вакуумплазменных

покрытия и ПДЛ молибденом в 8...11 раз снижает износ образцов, но износ контртела ниже всего при трении об образец после ПДЛ молибденом.

На углеродистых сталях за счет сверхбыстрой закалки, достигается чрезвычайно сильное дробление структурных элементов. Это демонстрирует просвечивающая электронная микроскопия и вид излома. О дополнительном раздроблении структуры свидетельствует появление на электронограмме почти сплошного тонкого кольца, соответствующего рефлексам (110) α -Fe.

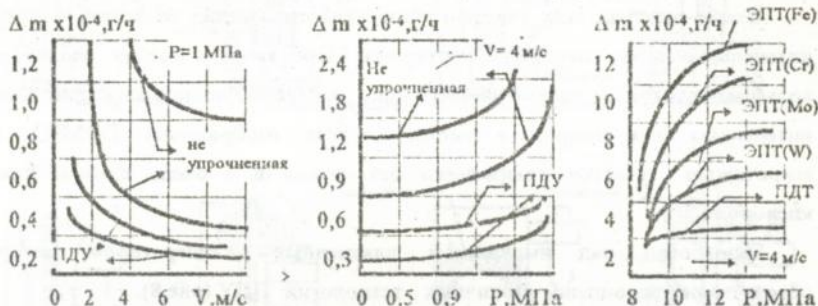


Рис.7. Графические зависимости износа поверхности после ПДУ в сравнении с обработанной по стандартной технологии при скорости скольжения $V=1-6 \text{ м/с}$ и контактном давлении $P=1-18 \text{ МПа}$.

Рентгенофазовый анализ обнаруживает в модифицированном слое наличие остаточного аустенита, интенсивность линий аустенита возрастает при интенсификации плазменной обработки.

Эффективность обработки зависит от атомарного веса элементов, составляющих плазму. Например, интенсивность линий аустенита выше при вводе в плазму молибдена, чем железа. Обнаружено резкое уменьшение отношения интенсивностей линий (110) α -Fe по сравнению с (200) α -Fe, что обусловлено развитием кристаллографической текстуры при фазовой перекристаллизации в условиях охлаждения при наличии сильного градиента температур. Для бестекстурного α -Fe соотношение интенсивностей $I_{110}/I_{200}=6,34$. В исходных образцах среднеуглеродистых сталей со шлифованной поверхностью оно несколько выше (около 9) из-за возможного вклада текстуры $\langle 110 \rangle$, формирующейся как при волочении, так и при шлифовке.

После интенсивной плазменной обработки оно падает до уровня около 3.

Присущая ориентация такого же типа формируется и в аустените модифицированного слоя. Это проявляется в резком снижении интенсивности

линии (111) по сравнению с линией (200), что обусловлено более высокой температурой нагрева, а также возможной стабилизацией аустенита легирующими элементами из среды плазмы.

После интенсивной обработки уширение рентгеновских дифракционных линий как α -Fe, так и γ -Fe можно считать пропорциональным $\lg \beta$, что свидетельствует о преобладающем вкладе в уширение неоднородных упругих искажений решетки Du/α .

В оже-спектрах всех участков поверхности изделия из стали наиболее интенсивны пики кислорода и углерода. При вводе в плазму молибдена, вольфрама, титана и железа имеются пики соответствующих металлов. Особо интенсивны пики углерода в темных участках изображения СОМРО, где встречаются участки практически без железа и с очень слабым пиком кислорода.

Разработан ряд импульсных плазменных генераторов, которые обеспечивают исполнение различных технологий ПДУ (рис.8).

Базовым генератором является коническое устройство с углом конусности 6 градусов и длиной реакционной камеры 100 мм, 200мм, 300 мм. Особенностью этого генератора является наличие расходуемого электрода -2 из легирующих элементов. Фокусирование осуществляется за счет кумуляции плазменных струй и поддекоматорными силами при прохождении электрического тока между концом электрода и внутренней поверхностью конуса реакционной камеры. Плазменные генераторы содержат межэлектродный зазор (реакционную камеру)-1, центральный электрод-2, детонационную пушку-3, источник электрического питания-4.

Наиболее простым вариантом плазменно-детонационного устройства является установка на базе горизонтально-фрезерного станка.

Этот тип устройств предназначен для установки в специализированном помещении, оснащенный системами нейтрализации звука, электромагнитного излучения и приточно-вытяжной вентиляцией. Более сложный вариант устройства встроен в кузов автомобиля.

Разработаны и изготовлены полуавтоматические плазменно-детонационные установки, встроены в кузов автомобиля - "МОПУС", а также размещенные в специализированном помещении - "ИМПУЛЬС". Опытный образец механизированного комплекса для плазменно-

детонационного упрочнения УН-138 М, который предназначен для установки в цехе, имеет встроенную камеру со звуконепроницаемыми стенками.

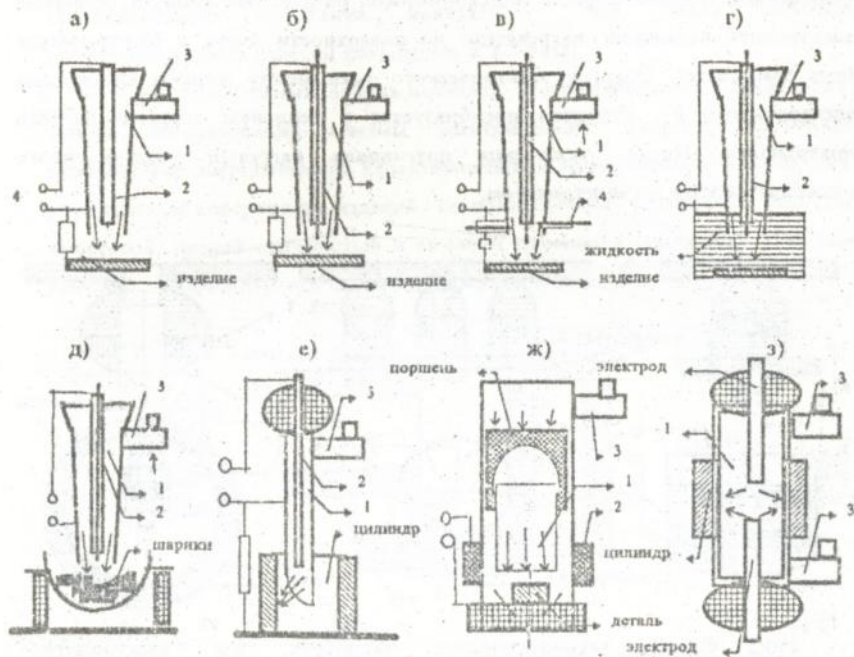


Рис.8. Схемы технологических устройств для плазменно-детонационного упрочнения изделий : а), б), в) имеющих плоскую и цилиндрическую конфигурацию ; г) под слоем жидкости; д) множество мелких деталей (шариков); е) внутренней поверхности; ж) сложной поверхности; з) цилиндров.

В комплект установки УН-138М входит: блок электрического питания типа В114; технологический блок со встроенными звукоизолированной камерой и генератором плазмы; манипулятор; блок газоподготовки и шкаф с системами управления.

Для упрочнения длинных ножей и больших пил деревообрабатывающей промышленности, а также для упрочнения инструмента в металлургической промышленности разработана установка УН-143 УХЛ4, которая обеспечивает упрочнение изделий длиной до 2000 мм, диаметром до 1500 мм.

Электролитно-плазменное упрочнение осуществляется технологическими устройствами, которые обеспечивают нагрев и охлаждение локальных участков поверхности (рис.9).

Устройства для электролитно-плазменной обработки изделий (катода)-1

содержат нагреватели-2 со встроенными в них анодами-3. Например, упрочнение листовых изделий осуществляется на технологической установке, оснащенной нагревателями с телескопической раздвижкой корпуса. Давление электролита поднимает нагреватели до поверхности листа и электрическая цепь замыкается. Энергия электрического тока между жидким электродом (электролитом) и изделием преобразуется в тепловую энергию нагрева поверхности. После отключения потенциала нагретый участок листа охлаждается этим же электролитом.

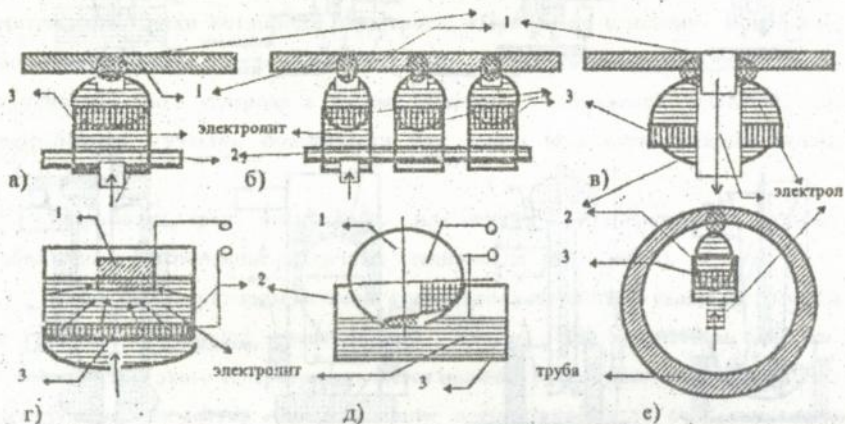


Рис.9. Схема технологических устройств для электролитно-плазменного упрочнения: а),б),в) — упрочнение локальных мест на плоских деталях, г) — концевой нагрев и закалка, д) — закалка диска (колеса) с вращением, е) — закалка локальных мест в трубе.

Разработана и изготовлена полуавтоматическая установка для электролитно-плазменного упрочнения кулаков шнеков очистных комбайнов, а также модификации универсальных установок для локальной закалки изнашиваемых поверхностей дисков борон, сеялок, зубьев экскаватора, поршня дизельного двигателя. Испытания показали, что после упрочняющей обработки работоспособность изделий повышается в 1,5-2 раза.

Варианты конструкций электрофрикционных установок схематически приведены на рис. 10. Поверхности электрода и изделия имеют линейные и угловые перемещения относительно друг друга. Зона их контакта охлаждается водой.

Разработаны и изготовлены механизированные установки для модифицирования изнашиваемых поверхностей конвейерных роликов

(см.рис.10.а.е.ж.), резцов проходческих комбайнов (см.рис.10.б.г.), пик отбойных молотков (см.рис.10.в.), дисков борон и сеялок (см.рис.10.д). Промышленные испытания показали, что после упрочнения работоспособность изделий повысилась в 2-3 раза.

Сопоставительный анализ показал, что разработанные технологии на основе использования плазмы электрического разряда обеспечивают необходимые энергетические характеристики и эффективность воздействия на упрочняемые поверхности изделий. Технологические установки, отличаются простотой, низкой стоимостью и высокой производительностью. Они имеют высокий коэффициент использования электрической энергии (60-85%).

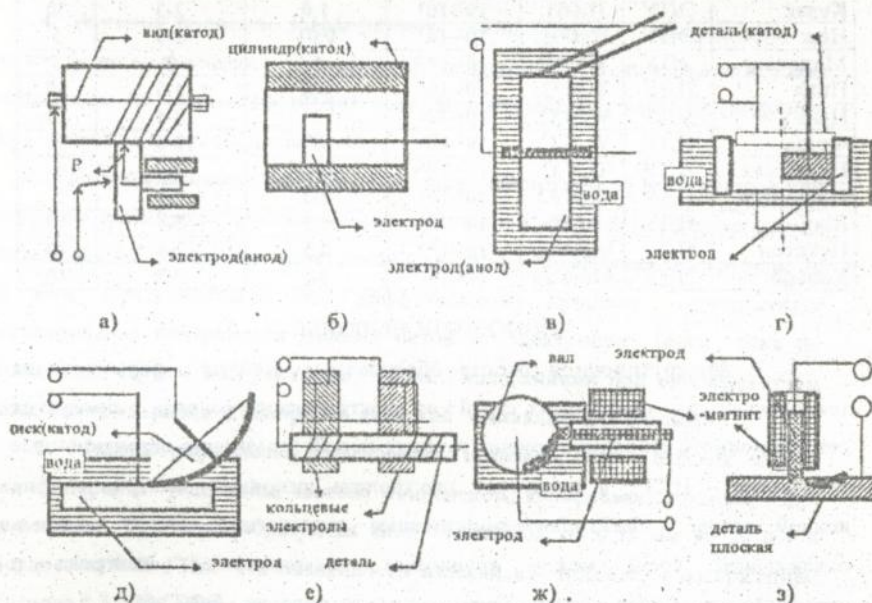


Рис.10. Схемы электро-фрикционных технологических устройств: а) б) цилиндрических изделий, в) пик отбойных молотков, г) тангенциальных резцов, д) дисков борон, е), ж) труб и валов, з) изделий, имеющих плоскую форму.

Комплекс разработанного оборудования обеспечивает возможность упрочнения поверхности различных деталей: сельскохозяйственных и дорожных машин, горнорудной и добывающей техники, автомобилей, насосов, компрессоров, двигателей и других машин, а также различного инструмента, используемого в металлургической, машиностроительной,

деревобработывающей и других отраслях промышленности для обработки металла, древесины, бумаги, кожи, древесностружечных плит, сельскохозяйственных продуктов и других материалов (см.табл.).

Примеры эффективности разработанных технологий

Таблица

Наименование изделий	Технология упрочнения	Состав плазмы	Плотность мощности, Вт/см ²	Производительность, шт/мин	Увеличение работоспособности, раз	Мощность, кВт
Резец	ЭФУ	В,С	10 ³ -10 ⁴	10	3-6	10
Ролик	ЭФУ	Si,C	10 ³ -10 ⁴	0,2	1,5-2	30
Пика	ЭФУ	В,С	10 ³ -10 ⁴	1,0	2-3	5
Диск	ЭФУ	С	10 ³ -10 ⁴	0,3	2-3	10
Кулак	ЭПУ	Н,ОН	10 ² -10 ³	1,0	2-3	30
Нож	ЭПУ	Н, ОН	10 ² -10 ³	0,01	2-5	5
Молоток	ЭПУ	Н,ОН	10 ² -10 ³	5	2	5
Пила	ПДУ	Ti,N,C	10 ⁵ -10 ⁶	0,5	4-5	10
Цепь	ПДУ	W,N,C	10 ⁵ -10 ⁶	2	3-4	10
Фреза	ПДУ	W,N,C	10 ⁵ -10 ⁶	1	2-3	10
Протыжка	ПДУ	Ti,N,C	10 ⁵ -10 ⁶	00,5	3-4	5
Пила ВК8	ПДУ	Cr,N,C	10 ³ -10 ⁴	0,3	2-3	5
Штамп	ПДУ	Mo,N,C	10 ⁵ -10 ⁶	0,5	3-4	10
Пуансон	ПДУ	Mo,N,C	10 ⁴ -10 ⁵	0,5	3-4	10
Кольцо	ПДУ	Mo,C,N	10 ⁴ -10 ⁵	10	2-3	10

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В диссертационной работе обоснованы методы формирования технологических плазменных струй от электрического разряда в продуктах детонационного сгорания горючих газовых смесей (плазменно-детонационные технологии - ПДТ); в продуктах электролиза щелочных электролитов на водной основе (электролитно-плазменные технологии - ЭПТ) и в охлаждающей среде между трущимися поверхностями электрода и упрочняемого изделия (электро-фрикционные технологии - ЭФТ).

2. Разработана математическая модель нестационарного процесса детонационного сгорания горючих газовых смесей в межэлектродном зазоре аксиальных плазматронов, обеспечивающая их расчет и оптимизацию конструкции при получении плазменных струй в диапазоне температур 2000-30000 К, скоростей до 8 км/с при времени воздействия на изделие до 5x10⁻³ с. Эти плазматроны используются для поверхностного термического упрочнения, химико-термической обработки и микронаплавки.

3. Установлено, что взаимодействие плазмы с поверхностью изделия осуществляется в среде газа и охлаждающей жидкости при плотностях электрического тока $10^2 \dots 10^3$ А/см². Методы и устройства для генерирования плазменных струй обеспечивают плотность мощности от 10^3 до 10^7 Вт/см². При этом обоснован ввод в плазму легирующих элементов в виде расходуемых электродов (стержни, проволоки, диски из легирующих элементов). Плазма может содержать до 50% по весу легирующих элементов в виде пара, ионов и капель, диаметр активного плазменного пятна при кумуляции плазменных струй и использовании методов электромагнитного фокусирования может быть от 5 до 40 мм.

4. Изучены процессы твердофазного (жидкофазного) легирования, а также физико-химических превращений в упрочняемой поверхности при охлаждении со скоростью 10^4 - 10^7 град/сек и воздействии плазмой (2000-8000 Дж), имеющей скорость до 8000 м/с.

5. При импульсно-плазменной обработке обнаружен эффект аномальной диффузии элементов при соударении плазменной струи с поверхностью. Ее составляющие (вольфрам, азот, молибден, титан) обнаружены на глубине до 40 мкм. Предполагается, что диффузионному процессу способствует активирование поверхности изделия потоком электронов (сила тока по плазменной струе 1-3 кА) и термоупругими колебаниями при одновременном воздействии ударного и напорного давлений составляющих плазмы.

6. Металлографические исследования показали, что изделия можно модифицировать углеродом, азотом, молибденом, вольфрамом, хромом, и др. элементами. При этом образуются слои толщиной от 0,01 мм до 10 мм и твердостью 8-20 ГПа. На поверхности изделий из сплавов с содержанием углерода 0,5-1,0%, после обработки импульсной плазмой, содержащей металлы с большим атомным весом (W, Mo) и имеющей плотность мощности (10^4 - 10^7 Вт/см²), образуются слои с твердостью 10-20 ГПа и толщиной 20...150 мкм.

7. Упрочняющая обработка вольфрамокобальтовых твердых сплавов импульсными плазменными струями, имеющими плотность мощности 10^3 - 10^4 Вт/см², аналогична лазерной. Наблюдаются мелко-дисперсные карбиды, полукарбиды вольфрама, продукты легирования кобальтовой связки элементами от распада карбидов и металлических составляющих плазмы.

8. Технология и оборудование для поверхностного упрочнения изделий

электрофрикционным методом с использованием электрического разряда в охлаждающей жидкости между трущимися поверхностями электрода-анода и изделия-катода обеспечивает легирование в расплаве поверхности изделия элементами из материала электрода (чугуна) и добавок порошков в межэлектродный зазор, например, карбида бора.

На поверхности образуется микроструктура борированного в расплаве слоя с твердостью 15-20 ГПа, слоя быстрозакаленной стали с твердостью 9-11 ГПа и закаленного слоя твердостью 7-9 ГПа. Толщина модифицированного слоя достигает 5 мм.

9. Электролитно-плазменное упрочнение осуществляется нагревом электрическим током проходящим по плазме из продуктов электролиза электролитов на водной основе и имеющим плотность мощности 10^2-10^4 Вт/см². Охлаждение осуществляется этим же электролитом с подключением электрического потенциала, что обеспечивает в поверхностном слое изделий из сплавов с содержанием углерода 0,3-0,6 % образование локальных включений твердостью от 50 до 67 HRC при толщине до 10 мм.

10. Область практического использования импульсно-плазменных технологий: стальной и твердосплавной инструмент, штампы, тяжелонагруженные детали двигателей, металлургического производства, горных машин, автомобилей, станков и других машин.

Разработанные промышленные технологии плазменно-детонационной, электролитно-плазменной и электрофрикционной обработки позволяют упрочнить конкретную поверхность, не нагревая изделия, работоспособность упрочненных изделий повышается в 2...8 раз.

11. Способы и технологические устройства (для ПДТ, ЭФТ и ЭПТ), генерирующие плазму в диапазоне температур 2000...30000 К, при скоростях от 0,1 до 8 км/с и времени взаимодействия с поверхностью от 60 с до 5×10^{-3} с защищены 60-ю авторскими свидетельствами и патентами.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Тюрин Ю.Н., Пикус Е.А. Повышение износостойкости деталей горных машин. Обзор. Донецк, ЦНИЭУголь, УССР, 1978. 64 с.
2. *Тюрин Ю.Н. Детонационная установка для нанесения покрытий. Пат. СССР N 719000. Приор. 05.04.79.. 6 с.
3. *Тюрин Ю.Н. Способ детонационного напыления покрытий и устройство

- для его осуществления. Пат. СССР N 879862. Приор. 16.06.81., 8с.
4. Тюрин Ю.Н., Кочерга Н.Г., Швец Г.С., Ральф С.Е. Защитные покрытия для шахтного оборудования из алюминиевых сплавов. Сборник научных трудов МакНИИ. Макевка, 1982, с. 24-29.
 5. *Тюрин Ю.Н. Устройство для нагрева изделий в электролите. Пат. СССР N 1375659. Приор 27.03.84., 5 с.
 6. Тюрин Ю.Н., Киселев Е.И., Каракуз Н.В. Повышение работоспособности тангенциальных вращающихся резов типа РКС. Журнал "УГОЛЬ", N 11, 1985.с.16-17
 7. *Тюрин Ю.Н. Способ литья с кристаллизацией под давлением. А.С. СССР N 1439835. Приор. 02.12.86., 7 с.
 8. *Тюрин Ю.Н. Устройство для электролитно-плазменного нанесения покрытий. Пат. СССР N 1277646. Приор. 11.12.86., 8 с.
 9. *Тюрин Ю.Н. Способ упрочнения стальных деталей. А.С. СССР N 1311263. Приор. 22.05.87., 10 с.
 10. *Тюрин Ю.Н. Газотермическое напыление колец торцовых уплотнений на автоматизированной детонационной установке, работающей на природном газе и кислороде. Сб. "Новые методы обработки газотермических, вакуумных и других видов покрытий". Киев, 1987, с. 87-89.
 11. *Тюрин Ю.Н. Способ термической обработки изделий. Пат. СССР N 1312974. Приор. 11.04.87., 5 с.
 12. *Тюрин Ю.Н. Устройство для зонного нагрева деталей в электролите. Пат. СССР N 1331074. Приор. 18.06.87., 11с.
 13. *Тюрин Ю.Н. Устройство для термической обработки деталей. А.С. СССР N 1340165. Приор. 26.06.87., 7с.
 14. *Тюрин Ю.Н. Установка для термической обработки деталей. А.С. СССР N 1441168. Приор. 27.07.87., 10с.
 15. *Тюрин Ю.Н. Способ нагрева деталей. Пат. СССР N 1488321. Приор. 10.03.87., 9.
 16. *Тюрин Ю.Н. Установка для нагрева и охлаждения изделий в электролите. А.С. СССР N 1605527. Приор. 10.02.88., 9.
 17. Борисов Ю.С., Тюрин Ю.Н. Упрочнение сплавов импульсными потоками плазмы. Сб. "Плазмотехнология", Киев, УМК ВО, 1990. с. 34-37.
 18. *Тюрин Ю.Н. Электролитно-плазменная упрочняющая обработка деталей сварных конструкций. Автоматическая сварка (Деп.). Киев, 1990, 10 с.
 19. Borisov Y.S., Tyurin Y.N., Borisova A.L., Gubenko B.G., Kokořina N.B. Plasma-detonation technology of iron-based alloy products hardening and properties of the produced layers. Joint symposium "Electron beam and thermal spraying processes for production of materials and coatings". Kiev, 1990, 43-48.
 20. Борисов Ю.С., Тюрин Ю.Н., Губенко Б.Г. Плазменно-детонационное формирование упрочняющих покрытий. Сб. Газотермическое напыление в промышленности". М., 1991, 73-75.
 21. *Тюрин Ю.Н. Упрочнение деталей машины импульсной плазменной струей. Сб. "Эффективные методы упрочнения для предприятий отрасли". Ростов-на-Дону, 1991, с. 47-48.
 22. Борисов Ю.С., Тюрин Ю.Н. Плазменно-детонационное упрочнение инструмента. Сб. "Прогрессивные методы получения конструкционных материалов и покрытий", Волгоград, 1991, с. 84-86.
 23. Борисов Ю.С., Тюрин Ю.Н. Обработка поверхности изделий импульсной плазменной струей. Сб. "Новые процессы и оборудование для нанесения

покрытий". Симферополь, 1991, с. 54-55.

24. Борисов Ю.С., Тюрин Ю.Н. Генераторы импульсных плазменных потоков и их использование для поверхностного упрочнения деталей. Сб. "Плазмотехнология-91". Запорожье, 1991, с. 46-48.
25. Yuschenko K.A., Borisov Y.S., Tyrin Y.N. Method and device for plasma-detonation working of metal articles. European patent N 0531527 A1, of 27.03.91.
26. Yuschenko K.A., Borisov Y.S., Tyrin Y.N. Coating Deposition and Surface Modifying with the Help of Plasma-Detonation Treatment. International Advances in Coating Technology. Orlando, USA, 1992, s. 123-134.
27. Борисов Ю.С., Тюрин Ю.Н. Электрогазодинамическое упрочнение металлорежущего инструмента. Сб. докладов на международной конференции. "Нетрадиционные и лазерные технологии". АЛТ-92, Москва, 1992, с. 34-37.
28. Борисов Ю.С., Тюрин Ю.Н. Упрочняющая обработка деталей высокоэнергетической плазмой. Препринт ИЭС-92-1, Киев, 1992, 36 с.
29. Борисов Ю.С., Тюрин Ю.Н., Губенко Б.Г. Плазменно-детонационная технология нанесения покрытий на изделия, изготовленные методами порошковой металлургии. Сб. "Теория и практика газотермического нанесения покрытий", том 2, Дмитров, 1992, с. 123-125.
30. Борисов Ю.С., Тюрин Ю.Н., Терпило В.Н. Нанесение упрочняющих покрытий на кокили для отливки автомобильных гильз. Сб. "Применение высокоэффективных процессов сварки", НТЦ "Информатика", Суздаль, 1992, с. 56-57.
31. Борисов Ю.С., Тюрин Ю.Н., Терпило В.Н. Нанесение покрытий на изделия, изготовленные методом порошковой металлургии, с использованием плазменно-детонационной технологии. Сб. "Прогрессивные технологии производства, структура и свойства порошковых изделий, композиционных материалов и покрытий", Волгоград, 1992, с. 67-68.
32. Борисов Ю.С., Тюрин Ю.Н. Использование высокоэнергетической плазмы самостоятельного электрического разряда в технологии обработки поверхности изделий. Сб. "Плазмотехнология-93", Запорожье, 1993, с. 45-47.
33. Тюрин Ю.Н. Плазменно-детонационная технология упрочнения деталей машин и инструмента. Сб. "Мотортехнология-94". N2. 1994, с.12.
34. Тюрин Ю.Н., Сахарнов М.В. Электролитно-плазменный метод поверхностного упрочнения. Сб. "Состояние и перспективы упрочнения деталей машин", Москва, 1994, с. 56-57.
35. Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Тюрин Ю.Н. Плазменно-детонационные процессы формирования потоков энергии и их взаимодействие с металлической поверхностью. Сб. "Физика и техника плазмы", т. 2, Минск, 1994, с. 284-287.
36. Борисов Ю.С., Тюрин Ю.Н. Электрогазодинамическое упрочнение изделий из чугуна. Там-же. с. 58-59.
37. Ефимов Н.А., Коржова Н.П., Лацко Д.В., Тюрин Ю.Н. Упрочнение поверхности стали 40Х плазменно-детонационной обработкой. Сб. Защитные покрытия на поверхности металлов. Киев, Наукова Думка, 1994, вып. 28, с. 14-18.
38. Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Тюрин Ю.Н. Теория и практика плазменно-детонационного модифицирования поверхности деталей машин и инструмента. Москва. Сварочное производство, 1994, N5, с 23-30.

39. Мордовец Н.М., Борисов Ю.С., Рачек А.П., Тюрин Ю.И. Структура, кристаллографическая текстура и микротвердость в приповерхностном слое углеродистой стали, модифицированной плазменно-детонационным методом. Сб. Защитные покрытия на поверхности металлов. Киев, Наукова Думка, 1994, вып. 28, с. 50-57.
40. *Tyurin.Yu. Electric friction technology and equipment for strengthening and sharpening of agricultural and mining tools. First Tri-Service Workshop Review on private R&D in FSU. (Purchase Order#68171-96-V-6306), 21.08.96. Moscow, Russia.
41. *Tyurin.Yu. Surface modification of iron-carbon alloys by plasma-detonation treatment. First Tri-Service Workshop Review on private R&D in FSU. (Purchase Order#68171-96-V-6306), 21.08.96. Moscow, Russia.
42. Yushenko K., Tyurin Yu, Borisov Yu. Technology for electrolytic-plasma quenching. Book of Abstracts second International conference MPSL'96. Sumy. 1996.
43. Yushenko K., Tyurin Yu, Borisov Yu. Surface modification of iron-carbon alloys . Book of Abstracts second International conference MPSL'96. Sumy. 1996.
44. *Tyurin.Yu. Technology and equipment for electrolytic-plasma quenching. First Tri-Service Workshop Review on private R&D in FSU. (Purchase Order#68171-96-V-6306), 21.08.96. Moscow, Russia.

Номера авторских свидетельств СССР и патентов по теме диссертации:							
669539.	719000.	736480.	741522.	795052.	803206.	879862.	
892805.	942327.	980320.	1045491.	1069308.	1083450.	1150956.	
1190654.	1277646.	1311263.	1312974.	1331074.	1340165.	1341838.	
1347471.	1374790.	1375659.	1381851.	1387438.	1396362.	1399231.	
1433060.	1438312.	1439835.	1441168.	1445011.	1464357.	1464481.	
1470781.	1481260.	1488321.	1496120.	1512139.	1537695.	546362.	
1602071.	1605527.	1611625.	1648805.	1686760.	1692294.	1702581.	
1709635.	1718546.	1718547.	1720296.	1741335.	1750104.	1792562.	1801277.
European patent N 0531527. Patentovy spis N 276792, Ceska a slovenska Federativnirennblika.							

АНОТАЦІЯ

Тюрін Ю.М. Науково-технічні основи поверхневого зміцнення виробів плазмою електричного розряду. Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.03.06. -Технологія та машини зварювального виробництва. Інститут електрозварювання ім. С.О. Патона НАН України, Київ 1995 р.

Робота присвячена дослідженню, розробці та впровадженню методів поверхневого зміцнення виробів плазмою електричного розряду. На основі системного підходу розроблено три принципово нових методи: плазмово-детонаційний, електролітно-плазмовий та електрофрикційний, які забезпечують формування плазми із температурою від 2000 до 30000 К, густиною від 1 до 10 кг/м³ і швидкістю до 8 км/с. Вивчено вплив основних параметрів плазми, розроблено ряд якісно нових технологій та досліджено ефективність їх застосування на різних матеріалах та виробках. На основі результатів дослідження взаємодії плазми із поверхнею виробу сформульовані основні принципи проектування обладнання для зміцнення різних виробів в промисловості.

Ключові слова: плазма, детонація, електроліт, електрична дуга, зміцнення, технологія, устаткування, економіка, впровадження.

ABSTRACT

Tyurin Yu.M. Scientific-and-Technical Principles of Surface Strengthening by Discharge Plasma. Manuscript. Thesis for a Doctor of Technical Sciences degree in speciality 05.03.06.- Welding Production Technology and Machines. E.O.Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1995.

The paper describes investigation, development and application of the methods for surface strengthening of workpieces by discharge plasma. Three cardinaly new methods were developed on the basis of a systematic approach, such as: plasma-detonation, electrolytic-plasma and electric-frictional.

These methods provide plasma which has the temperature from 2000 to 30000 K, density - from 1 to 10 kg/m³ and velocity - up to 8 km/s. The effect of the main plasma parameters was studied, a number of the qualitatively new technologies developed and the efficiency of their application for various materials investigated. The results on investigating the interaction of plasma with the surface of a workpiece were used a basis to formulate the main design principles for various commercial products.

Keywords: plasma, detonation, electrolyte, electric arc, strengthening, technology, equipment, economy.

Подп. в печ. 17.12.93. Формат 1/16 60X84. Бум. офс. N 2. Офс. печ.
Усл. печ. л. 2,25 п.л. Усл. кр. -Отг. 2,09. Уч. изд. л. 1,89. Тираж 110 экз. Зак.
N 6-327. ИЭС им. В.О.Патона, 252650 Киев 5, ГСП, ул. Горького, 69.

441222

AB 36.623