

УДК 621.793.74: 621.791.927.55

UDC 621.793.74: 621.791.927.55

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ПОКРЫТИЙ И ПУТИ УПРАВЛЕНИЯ ИХ КАЧЕСТВОМ

RESEARCH OF PLASMA SPRAY APPLICATION AND STRENGTHENING OF COATINGS AND WAYS OF QUALITY MANAGEMENT OF PLASMA COATINGS

Кадырметов Анвар Минирович
к.т.н., доцент
Воронежская государственная лесотехническая академия, Воронеж, Россия

Kadyrmetov Anwar Minirovich
Cand.Tech.Sci., associate professor
Voronezh State Forestry Academy, Voronezh, Russia

Представлены возможные пути управления качеством плазменных покрытий, такие как модуляция электрических параметров косвенной и выносной дуг плазматрона, вибро-, термо- и электромеханическая обработка покрытий и др. Приведены теоретические, на основе математического моделирования, и экспериментальные результаты влияния модуляции электрических параметров плазменного нанесения и упрочнения покрытий на их качество. Разработаны новые высокоэффективные ресурсосберегающие технологии и оборудование для нанесения и упрочнения покрытий на наружные и внутренние малогабаритные поверхности, на плоские, цилиндрические и профильные поверхности деталей пар трения

The article shows the possible ways to control the quality of plasma coatings, such as modulation of the electrical parameters of indirect and remote arc plasma torch, vibration, thermal and electro-coating process, etc. Theoretically based on mathematical modeling and experimental results of the effect of modulation of electrical parameters of the plasma deposition and hardening coatings on their quality are listed. We also developed new high-saving technologies and equipment for applying and hardening coatings on inner and outer compact surface on flat, cylindrical and shaped the surface of parts of friction pairs

Ключевые слова: ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ, УПРОЧНЕНИЕ, ПЛАЗМЕННОЕ ПОКРЫТИЕ, ПЛАЗМОТРОН, МОДУЛЯЦИЯ ПАРАМЕТРОВ, ПРЯМАЯ ДУГА, КОСВЕННАЯ ДУГА, ДЕТАЛЬ

Keywords: PLASMA SPRAYING, HARDENING, PLASMA COATINGS, PLASMA TORCH, MODULATION OF PARAMETERS, DIRECT ARCH, INDIRECT ARCH, DETAIL

Введение

Плазменное нанесение и упрочнение покрытий относится к прогрессивным технологиям, которые позволяют многократно с высокой эффективностью повышать надежность деталей машин в целом и их долговечность, в частности [1-3]. Основной целью данных технологий является обеспечение высокой износо- и коррозионностойкости поверхностей деталей при их изготовлении, а также восстановление размеров изношенных поверхностей деталей за счет нанесения на них покрытий. При этом к покрытиям, в первую очередь, предъявляются требования их высокой прочности, а также прочности их соединения с деталями. Во-вторых, покрытия должны обеспечивать высокую надежность деталей в условиях эксплуата-

ционных нагрузок (динамических, знакопеременных, подверженных абразивному, коррозионному, высокотемпературному или иному воздействию). Статья посвящена вопросам управления качеством плазменных покрытий, удовлетворяющих вышеуказанным требованиям, и содержит результаты теоретического обоснования и экспериментальных исследований.

Состояние исследований и актуальность работы

К преимуществам плазменного нанесения покрытий с помощью напыления относятся: возможность наиболее широкого варьирования материалами, позволяющей использование металлов, керметов и керамики; минимально возможный нагрев подложки и малая зона термического воздействия; возможность нанесения покрытий во всех положениях. Но широкое использование данных технологий сдерживается их недостатками. К недостаткам плазменного напыления относятся недостаточная при высоких эксплуатационных нагрузках прочность соединения с основой, слоистость структуры покрытия, повышенная пористость, накапливание остаточных напряжений в покрытии и тенденции его отслаивания при толщинах более 1 мм. Плазменная наплавка с использованием только одной дуги позволяет получать качественные монокристаллические покрытия, но только начиная со второго слоя ввиду проплавления основного металла и его перемешивания с материалом покрытия. Другим недостатком однодуговой плазменной наплавки является сильное термическое воздействие на основу, приводящее к высоким остаточным напряжениям и короблению.

Проблемой является достижение необходимого качества плазменных покрытий, обеспечивающего их использование при динамических, в том числе ударных, и знакопеременных нагрузках и лишенных указанных недостатков (перегрева подложки, отсутствия ее коробления и высоких остаточных напряжений). Использование двух дуг в гибридном процессе плаз-

менного напыления-наплавки не всегда пригодно и частично решает эту проблему, оно позволяет за счет гибкого регулирования мощностей дуг повысить качество покрытий, полученных плазменным напылением, и заметно снизить термическое воздействие на подложку, характерное для односторонней плазменной наплавки [3].

Объектом исследования являются процессы плазменного нанесения и упрочнения покрытий, предметом исследования – методы управления качеством получаемых покрытий. Целью исследования является обзор имеющихся и разработка новых методов плазменного нанесения и упрочнения износостойких покрытий, оптимально соответствующим эксплуатационным нагрузкам. Задачи исследования включают поиск и разработку методов стационарных (установившихся) процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий и методов с использованием динамических эффектов, в том числе и совмещенных комбинированных методов.

Решение проблемы повышения качества плазменных покрытий, лишенных вышеуказанных недостатков, зависит от выбора из общей массы наиболее существенных, лимитирующих факторов, которые могут быть приняты в качестве основных управляющих технологических параметров процесса, и оптимизируемых критериев процесса.

Поэтапная технологическая схема влияния факторов на критерии процесса представлена на рисунке 1. В качестве критериев процесса используются показатели качества покрытий (адгезионная и когезионная прочность, плотность, пористость, шероховатость, равномерность по толщине, уровень остаточных напряжений, однородность состава, микро- и макроструктуры) [4] или поверхностей, триботехнические критерии (коэффициент трения, износостойкость и др.) и интегрированные показатели эффективности технологического процесса (коэффициенты использования материала (КИМ), энергии (КИЭ), полезного действия процесса (КПД), комплексный критерий) [2, 5].

Все основные факторы процесса могут быть условно разделены на несколько групп. Согласно [4] это следующие группы: конструктивные параметры плазменного распылителя; параметры, характеризующие режим работы плазменного распылителя; параметры напыляемого материала и условий его ввода; параметры, характеризующие внешние условия напыления и параметры плазменной струи и потока напыляемых частиц. По оценкам различных исследователей на технологический процесс плазменного напыления в целом прямо или косвенно влияет от 20 до 60 и более факторов. Указанная схема влияний факторов плазменного нанесения и упрочнения покрытий на критерии этих процессов позволяет определить пути их совершенствования и методы управления ими. Анализ этих путей приводит к возможности эффективного улучшения плазменных покрытий с помощью использования методов динамизации параметров и, в частности, с помощью модуляции электрических параметров [6], а также путем комбинированных и совмещенных процессов с вибромеханической, электроискровой обработкой [2], термо- и электромеханической обработкой [7, 8] и др. (рис. 2).

Модуляция электрических параметров плазмотрона заключается в наложении импульсов тока прямой и обратной полярности на средний ток косвенной и прямой (вынесенной) дуг плазмотрона. Она приводит соответственно к импульсному увеличению или снижению мощности дуг и является технологическим методом, позволяющим просто регулировать электрические и энергетические характеристики дуг и, тем самым, эффективно управлять качеством покрытий.

Для упрочнения покрытий из самофлюсующихся материалов традиционно используется их оплавление. Упрочнение напыленных покрытий с

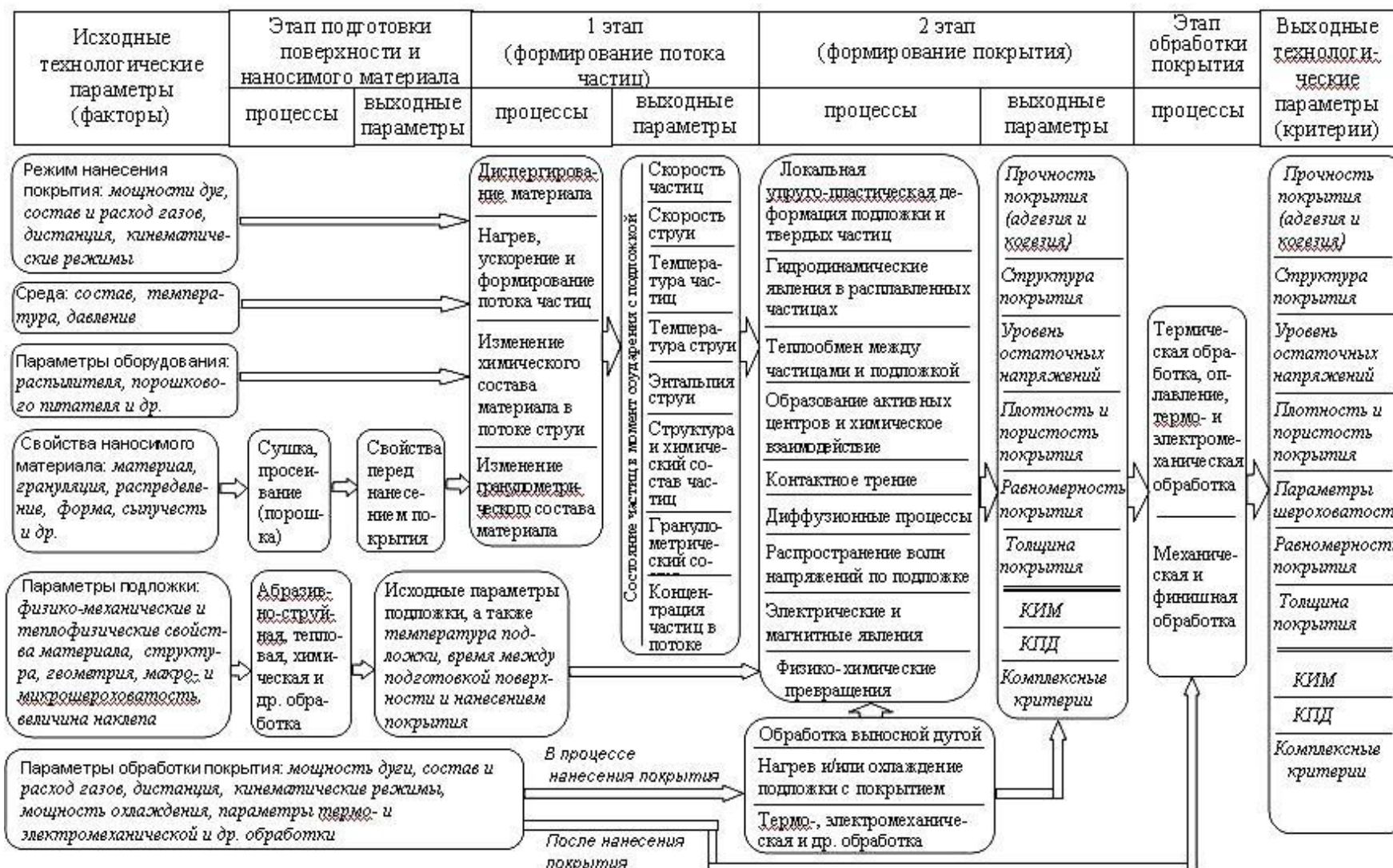


Рисунок 1. Схема структурно-следственной связи факторов и критериев технологического процесса плазменного нанесения и упрочнения покрытий



Рисунок 2. Технологические пути совершенствования плазменного нанесения покрытий и упрочнения покрытий, поверхностей

помощью термо- и электромеханической обработки позволяет уменьшить припуск на финишные операции шлифования и полирования, залечить микротрещины, сэкономить дорогостоящие материалы покрытия и абразивного инструмента. За счет высоких скоростей нагрева и охлаждения покрытий при электромеханической обработке возможно формирование высокопрочной структуры сорбита. К современным известным прогрессивным технологическим методам упрочнения поверхностей и покрытий, позволяющим получить повышенное качество поверхности, относятся плазменная закалка, модификация, финишное плазменное упрочнение [3] и для

поверхностей сложного профиля – комбинированная отделочно-упрочняющая обработка гранулированной токопроводящей средой. В этом случае комбинированная обработка образцов до и после нанесения покрытия проводится на струйнодинамических установках эжекторного типа с наложением тока низкого напряжения [9].

Результаты моделирования процессов

Теоретический анализ процессов нанесения и упрочнения покрытий при модуляции электрических параметров плазмотрона проводился путем разработки математических моделей и последующего моделирования [6].

В интервале изменения длительности импульсов мощности дуги прямой полярности t^+ от 20 до 300 мкс и амплитуды импульсов мощности ΔN^+ от 50 до 500 кВт увеличение частоты модуляции тока дуги n_m до 3 кГц приводят к увеличению скорости частиц в среднем в 1,3 раза. Более чувствительными к модуляции являются частицы с менее плотным материалом. Показано, что влияние частоты модуляции возрастает с увеличением амплитуды импульсов мощности и с увеличением длительности импульсов. Увеличение длительности и амплитуды импульсов мощности также приводит к увеличению скорости частиц на величину до 40-60%. Влияние модуляции тока дуги плазмотрона на температуру частиц выражается в ускорении их нагрева и плавления. При этом скорости плавления частиц и скорость их движения возрастают пропорционально друг другу.

Зависимость температурного поля напыляемой поверхности от параметров модуляции электрических параметров имеет два пространственно-временных аспекта. В локальном пространственно-временном масштабе показано, что при импульсном увеличении мощности выносной дуги в местах её привязки к напыляемой поверхности обеспечивается проплавление поверхности до переходной зоны «покрытие-подложка». Это обеспечивает гарантированное соединение покрытия с подложкой.

В масштабе всей поверхности модуляция мощности выносной дуги позволяет обеспечить равномерность температурного поля основы на всей её поверхности. Результаты расчетов для цилиндрических деталей при напылении по винтовой линии показали, что разброс температур при регулировании мощности импульсов составляет 2...5%. При традиционном использовании предварительного подогрева с помощью плазмотрона без его продольной подачи разброс температур составляет 10...20 %. Уменьшение разброса температур позволяет уменьшить различие температурных деформаций поверхности детали, тем самым обеспечить равномерное качество покрытия на всей поверхности, улучшить адгезию покрытий с основой, уменьшить остаточные напряжения и повысить ресурс работы нагруженных деталей транспортных машин [7].

В качестве примера приведены расчеты параметров коленчатого вала двигателя КАМАЗ-740 (рис. 3), которые показали, что разброс температур поверхности напыления уже на третьем витке обработки не превышает 5 °С.

Использование модуляции мощности выносной дуги при напылении на профильные поверхности таких деталей, как рабочие органы транспортных, почвообрабатывающих, лесных и строительно-дорожных машин показало, что неравномерность нагрева на их поверхностях может быть снижена с 600 °С до 10-20 °С.

Результаты моделирования позволили наметить условия проведения экспериментального исследования процесса и задать технические параметры экспериментального оборудования, послужили исходными данными для промышленных разработок средств технологического оснащения для нанесения и упрочнения покрытий.

Результаты экспериментального исследования

Для проведения экспериментального исследования была разработана установка [10], принципиальным отличием которой от известных является наличие в ней модуляторов токов косвенной и прямой дуг. Модуляторы позволяют импульсно модулировать токи дуг плазмотрона однополярными (прямой и обратной полярности) и двухполярными импульсами. Импульсы тока создаются от зарядов, накопленных в емкостях конденсаторов, и разряжаются на постоянные токи косвенной и прямой дуг. Заряды и разряды

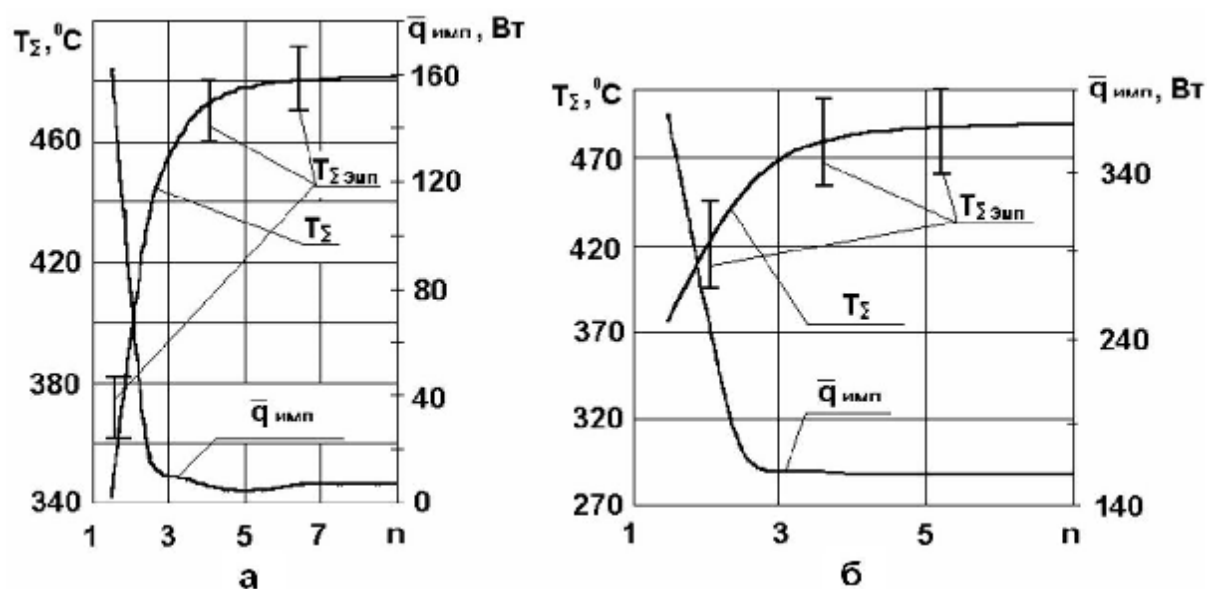


Рисунок 3. Распределение температуры T_{Σ} поверхности шеек коленчатого вала по количеству витков обработки n : а) шатунная шейка; б) коренная шейка; $T_{\Sigma_{эмп}}$ – измеренная температура; $\bar{q}_{имп}$ – средневзвешенное значение импульсов мощности

реализуются открытием и закрытием тиристорных мостов, в которых заключена емкость конденсаторов.

В качестве плазмообразующего газа использовали азот, воздух или воздушно-пропановую смесь. В качестве напыляемого материала использовали никель-титановый интерметаллид (порошок ПН55Т45) фракцией 40-100 мкм, самофлюсующийся материал на основе никеля (порошок ПГ-

CP4) фракцией 40-64 мкм, никель-алюминиевый материал (ПН85Ю15) фракцией 40-64 мкм и их смеси.

Экспериментальные исследования газодинамических и температурных параметров показали [7], что модуляция электрических параметров косвенной и прямой дуги плазмотрона приводит к повышению уровня энергетического состояния напыляемых частиц и обеспечению равномерности поля температур и проплавления покрытия до границы «покрытие-основа» в местах привязки выносной дуги во время импульсов её мощности. Это послужило предпосылкой повышения физико-механических и триботехнических свойств покрытий.

Эксперименты показали, что модуляция электрических параметров плазмотрона улучшает физико-механические и триботехнические характеристики покрытий [7]. Получено, что модуляция тока косвенной дуги плазмотрона увеличивает прочность соединения покрытия с основой на 20-23 МПа (от 15-19 МПа), повышает квазитвердость покрытий на 10-25 НРСэ, микротвердость – на 1-3 ГПа, уменьшает газопроницаемость покрытий в ~ 4-10 раз, повышает износостойкость покрытия в условиях изнашивания в абразивно-масляной прослойке в 1,14-1,9 раз.

Анализ типичных микроструктур и рентгеноструктурного анализа покрытий показал, что импульсная модуляция косвенной дуги плазмотрона приводит к заметному уменьшению оксидных и неметаллических составляющих в покрытии (в 2-3 раза). При этом основную долю неметаллических включений составляют оксиды: для материала ПН55Т45 – TiO (C , O), для самофлюсующегося материала ПГ-CP4 – Cr_2O_3 , FeO , B_2O_3 , SiO_2 , для материала ПН85Ю15 – кроме перечисленных дополнительно Al_2O_3 . Это может быть обусловлено тем, что при плазменном напылении с модуляцией электрических параметров генерируются ударные волны, воздействие которых на напыляемые жидкие частицы приводит к ударной дегазации кислорода и азота из них. Повышение физико-механических ха-

ра характеристик и износостойкости покрытий при модуляции тока косвенной дуги объясняется повышением энергетического уровня напыляемых частиц в момент удара о подложку, а именно, повышением скорости и температуры частиц.

Модуляция тока прямой (выносной) дуги при оплавлении покрытия в процессе плазменного напыления с помощью косвенной дуги позволяет повысить прочность соединения покрытия с основой на 15-25% и достичь значений 120-150 МПа. При этом по сравнению со случаем без модуляции выносной дуги пористость покрытий снижается с 0,4-0,72% до 0,31-0,51%. Уменьшение пористости способствует увеличению твердости до значений 55-60 HRC_э (с 50-55 HRC для случая без модуляции выносной дуги). Данное улучшение характеристик покрытия может быть объяснено регулярным импульсным воздействием выносной дуги на покрытие с необходимой амплитудой мощности, которое обеспечивает равномерное распределение и увеличение областей локального оплавления покрытия на глубину до границы переходной зоны «покрытие-подложка». Увеличение объема оплавленных зон обеспечивает более полное всплытие пор с флюсом. Более равномерное распределение зон импульсного воздействия выносной дуги обеспечивает уменьшение концентрации напряжений на поверхности детали. Это объясняет увеличение предела выносливости у образцов с покрытиями, полученными без модуляции, со 180 МПа до 210 МПа для образцов с покрытиями, полученными с использованием модуляции.

Металлографический анализ показал увеличение степени дисперсности упрочняющих фаз и пересыщение твердого раствора на основе никеля, что может являться причиной повышения микротвердости покрытия с 5,55-8,91 ГПа (при отсутствии модуляции выносной дуги) до 6,12-10,62 ГПа (в случае модуляции). Повышение степени дисперсности упрочняющих фаз покрытия может быть объяснено кратковременностью импульса и быстрым охлаждением каждой из зон импульсного оплавления. Повыше-

ние твердости и микротвердости покрытий приводит к повышению износостойкости покрытий, полученных с использованием модуляции выносной дуги, в 1,25-1,35 раз по сравнению со случаем без модуляции (рис. 4).

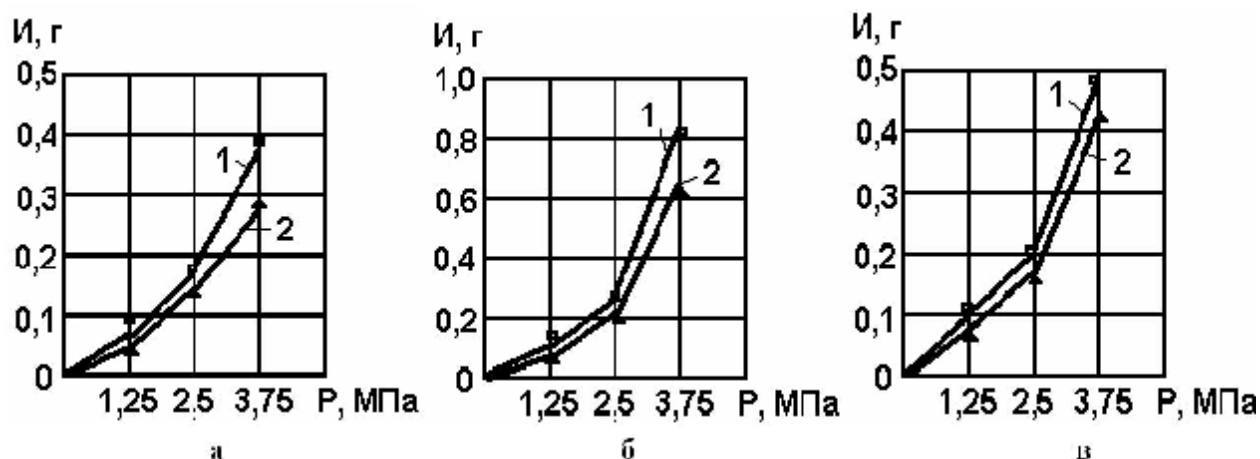


Рисунок 4. Зависимость износа I от удельного давления P при различных скоростях скольжения: а) $V = 0,78$ м/с; б) $V = 1,3$ м/с; в) $V = 2,6$ м/с; 1, 2 – режим без модуляции и с модуляцией выносной дуги соответственно

Проведение рентгеноструктурного анализа установило присутствие в покрытии следующих фаз: твердого раствора на основе никеля в количестве 38 %, эвтектики в количестве 50% и 12% карбоборидной фазы (карбиды хрома (Cr_7C_3 и $Cr_{23}C_6$), бориды никеля и хрома (CrB , Ni_3B , Ni_2B), силициды никеля (Ni_5Si_2 , Ni_2Si) и небольшое количество оксидов хрома, бора, кремния и алюминия). Равномерность температурного поля в начале и конце нанесения покрытия, обеспечивает равномерность распределения вышеуказанных фаз в аналогичных количествах. Сопоставление данных с модуляцией и без модуляции электрических параметров выносной дуги показывает на незначительные качественные изменения в структурных составляющих и изменение количественных соотношений фаз Ni , CrB , CrB_2 , Ni_3B , Ni_2B , Cr_3C_2 , Cr_7C_3 .

Термо- и электромеханическая обработка покрытий позволяет дополнительно повысить качество покрытий [7]. При термомеханической

обработке покрытие приобретает более плотную и равновесную структуру, а также остаточные напряжения сжатия вместо напряжений растяжения. При электромеханической обработке одновременно с механическим воздействием, уплотняющим и спекающим частицы покрытия, осуществляется его термическая обработка при высоких скоростях нагрева и охлаждения ($\sim 10^5$ ° C/c), приводящая к выделению наноразмерных упрочняющих фаз на основе боридов, карбидов, силицидов [8]. Это приводит к повышению прочности соединения покрытия с основным металлом на 10 % и более, уменьшению его газопроницаемости в 5...6 раз, растеканию и заполнению пор и повышению предела выносливости восстановленных деталей на 14...18 % и более, повышению износостойкости в 1,4 раза и более, уменьшению припуска на шлифование до 0,03...0,05 мм. Однако при толщине покрытий примерно более 0,5 мм термо- или электромеханическая обработка может приводить к растрескиванию и отслаиванию покрытий вследствие наличия в них высоких остаточных напряжений и хрупкости. Устранение данного недостатка возможно за счет совмещения в одной технологической операции процессов плазменного нанесения покрытия с одновременной электромеханической обработкой [11].

Управление качеством плазменных покрытий и технология

Управление качеством плазменных покрытий в технологических процессах традиционно осуществляется оптимизацией технологических параметров предварительной подготовки поверхности, режимов нанесения покрытия и его упрочнения, последующей обработки покрытия. Эффективное управление качеством плазменных покрытий возможно путем наложения импульсов силы тока на средние значения силы тока косвенной и прямой дуг в режиме модуляции электрических параметров [6, 7], либо путем термо- или электромеханической обработки покрытия [7, 8, 11].

Технологические параметры импульсной модуляции тока дуги плазмотрона содержат частоту модуляции и параметры импульсов – амплитуду, длительность, форму. Частота модуляции достаточно просто регулируется задающим генератором частоты. Амплитуда, длительность и крутизна импульсов регулируется подбором емкостей и активных сопротивлений модуляторов. Исследования позволили разработать технологические рекомендации по выбору режимов операций нанесения и упрочнения покрытий с модуляцией электрических параметров для различных типов деталей и условий работы их поверхностей трения. Методика выбора режимов нанесения и упрочнения покрытий в общем случае включает в себя два этапа. На первом этапе находятся оптимальные области режимов без модуляции, на втором – выбор схемы и режимов модуляции.

Выбор режимов модуляции для напыления косвенной дугой основан на двух принципах. Первый принцип заключается в максимизации выделяемой энергии в каждом импульсе при минимально возможной его длительности, то есть в максимизации амплитуды мощности импульсов. Целью здесь является получение ударных волн с возможно большей интенсивностью при умеренной эрозии электродов и испаряемости порошка. Для этого случая предпочтительна схема комплексной двухполярной модуляции, когда каждый импульс тока состоит из импульса вычитания и импульса сложения, причем импульс вычитания переходит в импульс сложения. Другой принцип заключается в интенсификации теплообмена в системе «дуга – плазменная струя – частицы» с помощью создания интенсивных акустических волн в плазменной струе (свыше 150 дБ) на частотах более 5 кГц. Амплитуды импульсов тока здесь могут быть ограничены. В данном случае предпочтительна схема однополярной импульсной модуляции (обратной полярности).

Поиск режимов модуляции выносной дуги также основывается на двух принципах. Первый принцип заключается в создании оптимальных

амплитуды и длительности каждого импульса мощности, обеспечивающих локальные участки проплавления покрытия до границы переходной зоны «покрытие-подложка» в моменты воздействия импульсов. Вторым принципом заключается в оптимизации концентрации количества локальных зон проплавления и обеспечении равномерности свойств покрытия в масштабе всей поверхности покрытия. Вторым принципом реализуется с помощью регулирования частоты модуляции.

Термомеханическое упрочнение покрытий целесообразно проводить двухступенчатой обработкой [7]. На первой стадии обработка проводится при высоких температурах покрытия (> 1400 °К). Целью первой стадии является выполнение размера образца, обеспечивающего минимальный припуск на шлифование. Усилия обкатки при этом не превышают 250...550 Н/мм. Вторая стадия проводится традиционным способом без нагрева с постепенным увеличением усилия до величины 400...800 Н/мм. Целью второй стадии является упрочнение покрытия.

Некоторые детали автомобилей и машин (кулачки распределительных и шейки коленчатых валов, гильзы цилиндров, чашки дифференциалов, направляющие станков и др.) испытывают неодинаковые по уровню эксплуатационные нагрузки в различных частях поверхностей трения. С целью экономии трудоемкости и материальных ресурсов целесообразно создание закономерного изменения качества рабочих поверхностей, обеспечивающих их равномерный износ. Использование модуляции электрических параметров плазменного нанесения и упрочнения покрытий позволяет решить эту задачу за счет автоматизированного изменения параметров импульсов тока косвенной и/или прямой дуги - амплитуды, длительности и формы импульсов, а также частоты модуляции. При вибромеханической обработке это может быть реализовано программированием движения инструмента, обеспечивая необходимые типы и законы изменения микрорельефа поверхности [12]. При электромеханической обработке это может

быть выполнено путем автоматизированного изменения силы тока [12]. Указанные параметры могут быть использованы и при адаптивном управлении качеством покрытий на заданном уровне независимо от изменения условий и колебаний факторов процесса нанесения и упрочнения плазменных покрытий.

Выводы

1. Моделирование процессов плазменного напыления и упрочнения покрытий при импульсной модуляции электрических параметров повышает энергетическое состояние частиц в момент удара о подложку, позволяет обеспечить проплавление покрытия в локальных участках поверхности и их заданное распределение в масштабе всей поверхности, что является важной предпосылкой повышения прочности соединения покрытия с основой и уменьшения пористости покрытий;

2. Модуляция тока косвенной дуги плазмотрона и регулярное импульсно-модулируемое воздействие выносной дуги на покрытие позволяет улучшить физико-механические и триботехнические свойства покрытий:

– повышается прочность соединения покрытия с основой в 1,5...2 раза; увеличивается твердость покрытия в 1,2...1,7 раз; понижается газопроницаемость покрытия в 4...10 раз; повышается износостойкость покрытия (в условиях изнашивания в абразивно-масляной прослойке она возрастает в 1,14...1,9 раз).

– при использовании гибридного процесса напыления-наплавки с помощью косвенной и выносной дуг модуляция последней позволяет получить покрытия с высокими физико-механическими и триботехническими свойствами: прочность соединения покрытия с основой увеличивается в 1,15...1,25 раза, микротвердость – в 1,1...1,2 раза, сопротивление усталости образцов – до 1,2 раз, износостойкость покрытий – в 1,25...1,35 раза. Пористость покрытий понижается в 1,2...1,3 раза.

3. Управление качеством плазменных покрытий возможно за счет использования импульсной модуляции электрических параметров плазмотрона, а при повышенных требованиях к покрытию – за счет совмещенного с напылением или последующего упрочнения вибро-, термо-, электромеханической обработкой. Упрочнение напыленных плазменных покрытий вибро-, термо- и электромеханической обработкой обеспечивается за счет изменения структуры покрытия, его уплотнения, выделения в нем упрочняющих наночастиц и повышения когезионной прочности между частицами покрытия.

4. На основе проведенных исследований разработана комплексная технология плазменного нанесения и упрочнения покрытий с использованием импульсной модуляции электрических параметров плазмотрона.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки РФ (№ 7.4045.2011).

Литература

1. Кудинов В. В., Пекшев П. Ю., Белашенко В. Е. Нанесение покрытий плазмой. М.: Наука, 1990. 406 с.
2. Пузряков А. Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: Учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпози́тов». 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 360 с.
3. Соснин Н. А., Ермаков С. А., Тополянский П. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 406 с.
4. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: Учебник для вузов / В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин и др. М.: Металлургия, 1987. 792 с.
5. Борисов Ю. С., Борисова А. Л. Плазменные порошковые покрытия. Киев: Техника, 1986. 223 с.
6. Кадырметов А. М., Сухочев Г. А. Особенности процесса воздушно-плазменного нанесения и упрочнения покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. №4(52). С. 25-28.
7. Сухочев Г. А., Кадырметов А. М. Экспериментальные исследования параметров управляемости процесса воздушно-плазменного нанесения и упрочнения покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. №11(47). С. 53-56.

8. Структура и механические свойства плазменных покрытий после электро-механической обработки / В. П. Багмутов, В. И. Калита, И. Н. Захаров, С. Н. Паршев // Физика и химия обработки материалов. 2007. № 3. С. 22-28.

9. Технологическое обеспечение качества нанесения защитных покрытий комбинированной обработкой [Текст] / Г. А. Сухочев, О. Н. Кириллов, А. М. Кадырметов, и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. №8(68) . С. 39-44.

10. Патент № 2211256 РФ, МПК 7 С 23 С 4/12. Способ нанесения покрытия / Д. И. Станчев, А. М. Кадырметов, В. Н. Бухтояров, А. В. Винокуров. БИ № 24. 2003.

11. Перспективы упрочнения покрытий методом плазменного напыления с одновременной электро-механической обработкой / А. М. Кадырметов, В. О. Никонов, В. Н. Бухтояров и др. // Станочный парк. – 2012. - №6. – С. 58-60.

12. Инженерия поверхности деталей / А. Г. Суслов, В. Ф. Безъязычный, Ю. В. Панфилов и др.; под ред. А. Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.