УДК 621.793.74

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ И ПРЕДПОСЫЛКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПЛАЗМОНАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

О. М. Тимохова[1], Е. В. Снятков[2], А. Д. Радченко[2], П. С. Рюмин[2]
[1]ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта, Россия
[2]ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия
E-mail: otimohova@ugtu.net

Эффективность повышения надежности деталей машин и их эксплуатационных показателей основывается на использовании прогрессивных технологий их изготовления и восстановления. В отношении обеспечения высокого качества поверхностей деталей к таким технологиям относятся плазменные технологии нанесения и упрочнения покрытий [1, 2]. Плазменные технологии дают возможность наносить наиболее широкую номенклатуру материалов (металлы и их сплавы, керамику и металлокерамику, полимеры и различные смеси) из более чем трехсот промышленных наименований. Плазменные покрытия позволяют обеспечить высокие эксплуатационные износо- и коррозионностойкость рабочих поверхностей нагруженных деталей как при их изготовлении, так и при восстановлении, включая изношенные поверхности сложного профиля нагруженных деталей транспортирующих машин и систем, включая детали двигателей внутреннего сгорания, лопаточные, корпусные детали роторной группы насосных агрегатов и др. Плазменные покрытия на указанных деталях позволяют при отлаженных технологических режимах обеспечить высокую собственную прочностью и адгезионную прочность соединения покрытия с материалом основы детали. Это обеспечивает им высокую надежность в условиях эксплуатационных динамических и знакопеременных нагрузок, сопровождаемых абразивным, коррозионным, высокотемпературным или иным воздействием. В связи с этим актуальным является поиск и оптимизация перспективных способов плазменного нанесения и упрочнения покрытий, включая комбинированные, технологическая отработка которых даст возможность на основе управление качеством плазменных покрытий удовлетворить вышеуказанные требования. Широкое использование данных технологий несмотря на их достигнутый современный уровень сдерживается их недостатками: недостаточной прочностью соединения покрытий с основой и их собственной прочностью, перегревом

подложки при плазменной наплавке, высокими остаточными напряжениями покрытия и короблением подложки. Основной проблемой плазменных технологий нанесения и упрочнения покрытий является достижение их необходимого качества, необходимого для использования в условиях эксплуатации при динамических, ударных, и знакопеременных нагрузках.

Состояние и актуальность управления качеством плазменного нанесения и упрочнения покрытий

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.

Влияние факторов на критерии плазменного нанесения и упрочнения покрытий осуществляется через последовательные технологические этапы: подготовки поверхности под нанесение покрытия и подготовки наносимого материала, формирование потока частиц в плазменной струе, формирования покрытия, обработки покрытия [3]. В качестве критериев процесса используются показатели качества покрытий (когезионная и адгезионная прочность, пористость, плотность, шероховатость, уровень остаточных напряжений, равномерность по толщине, однородность состава, микро- и макроструктуры) или поверхностей, триботехнические критерии (износостойкость, коэффициент трения и др.) и интегрированные показатели эффективности технологического процесса (коэффициенты использования энергии, материала, полезного действия процесса, комплексные критерии).

Все основные факторы процесса могут быть условно разделены на несколько групп: 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. Наиболее важными из всех технологических операций плазменного нанесения и упрочнения покрытий являются операции подготовки поверхности перед нанесением покрытия, непосредственно нанесение покрытия и его последующая обработка. При этом основные факторы, существенно влияющие на качество обработки поверхностей деталей машин можно подразделить

на две группы – неуправляемых и управляемых (управляющих) факторов (рис. 1). Эти группы состоят из подгрупп, объединяющих отдельные факторы, близкие по характеру своего влияния на показатели качества обработки.

Управляемые факторы обеспечивают возможность влияния на вышеуказанные критерии процессов нанесения и упрочнения покрытий, то есть на показатели качества этих процессов и получаемых покрытий, поэтому эти факторы являются не только управляемыми, но и управляющими по отношению к качеству упрочняющей обработки поверхностей деталей. 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 [4], а также путем комбинированных и совмещенных процессов с вибромеханической, электроискровой обработкой, термо- и электромеханической обработкой и др. [5, 6] (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 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 [7] 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 струйно-динамических установках эжекторного типа с наложением тока низкого напряжения [1].

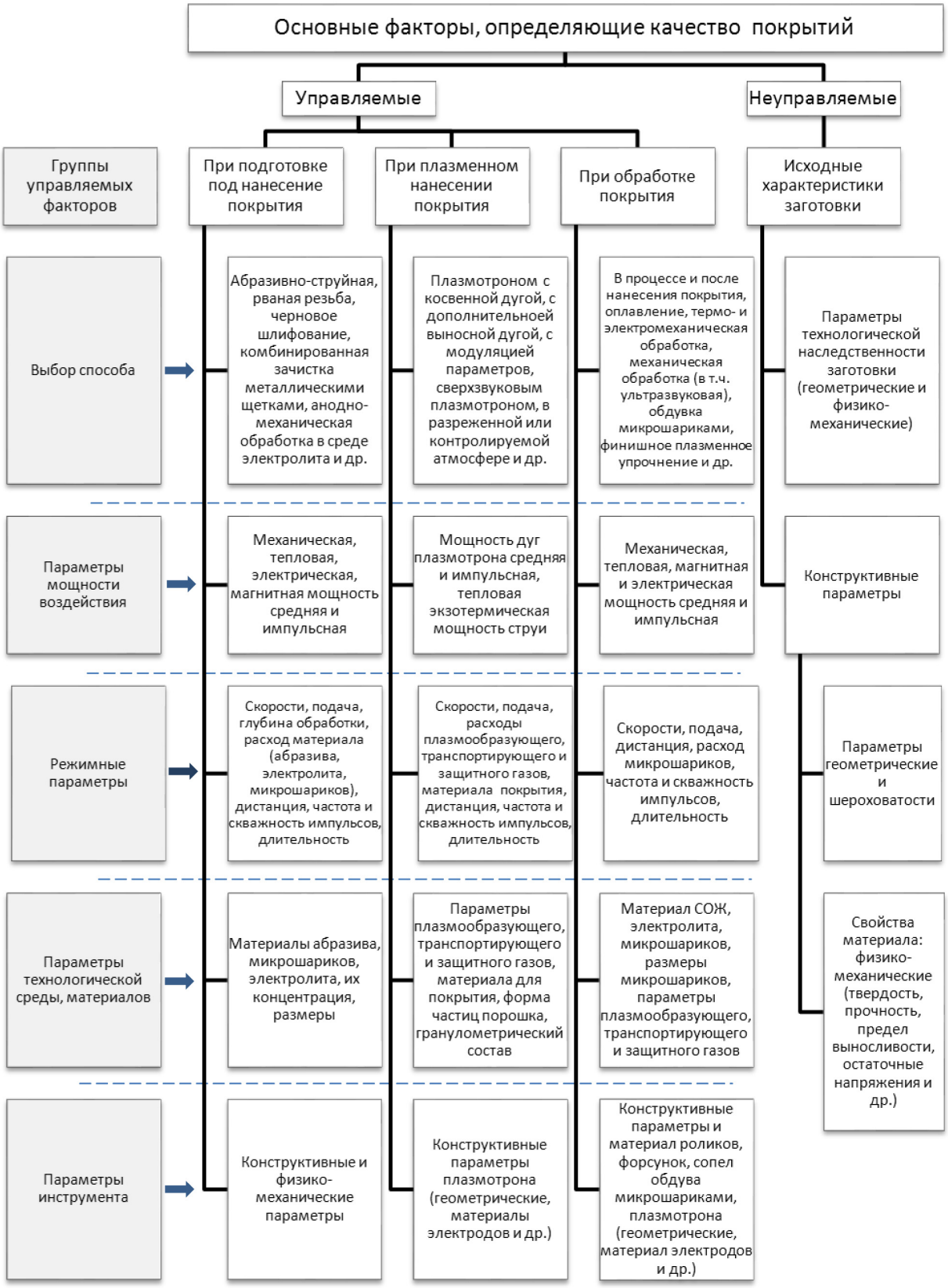


Рисунок 1 – Основные факторы, влияющие на качество плазменных покрытий

Возможности совершенствования плазменного нанесения и упрочнения покрытий

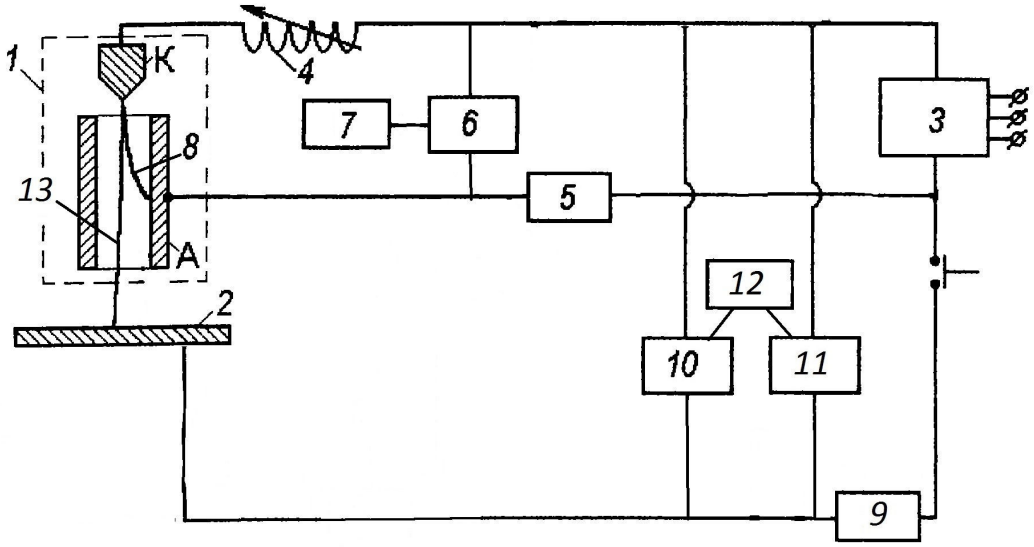
	Добавление присадок в плазмообразующий газ (углеводородов в воздух)	Модуляция электрических параметров (для плазмотрона с самоустанавливающейся длиной косвенной дуги)		Термо- и электромеханическая обработка покрытий
		косвенной дуги	выносной (прямой) дуги	
Влияние на газодинамические и теплофизические параметры:	– достижение максимального уровня удельной энергии плазменной струи 4,17 Дж/м^3, ее теплопроводности в 2-10 раз более, чем у др. газов [ ]; – создание нейтральной или восстановительной атмосферы (защита материалов от окисления); – увеличение температуры газовоздушной смеси до 17 % и снижение темпа ее уменьшения вдоль струи [ ]; – повышение скорости струи и частиц до 10 % и однородности распределения скорости и температуры в ее поперечных сечениях	– генерирование в плазменной струе ударных волн слабой интенсивности с числом Маха М=1,06 при импульсной модуляции прямой полярности мощности дуги; – повышение скорости частиц до 60 м/с (на величину до 50 %) и увеличение их нагрева и плавления с увеличением частоты модуляции до 2 кГц, длительности импульсов прямой полярности – до 300мкс, амплитуды импульса мощности до 500 кВт	– повышение удельной энергии плазменной струи; – увеличение доли расплавленных частиц и коэффициета использования материала; – частичное дискретное расплавление покрытия до границы с основой; – обеспечение равномерности температурноного поля поверхности основы в пределах 3-5 °С	– равномерный нагрев покрытия до температур пластического состояния или плавления
Влияние на свойства покрытий:	– увеличение прочности соединения покрытия с основой на 15-30 %; – повышение квазитвердости покрытия на 30-50 %; – снижение газопроницаемости покрытия на 14-30 %; – повышение износостойкости покрытия на величину до 30 %; – уменьшение оксидных и неметаллических включений в покрытии до 2-3 раз	– увеличение прочности соединения покрытия с основой на 52-86 %; – повышение квазитвердости покрытия на 36-76 %; – снижение газопроницаемости покрытия на 46-51 %; – повышение износостойкости покрытия на величину до 44 %; – уменьшение оксидных и неметаллических включений в покрытии до 2-3 раз	– повышение прочности соединения покрытия с основой на 15-25 % до 120-150 МПа; – повышение твердости покрытия (до 55-60 HRC) на 9-11 %; – снижение пористости покрытия на 29-41 % (с 0,4-0,72% до 0,31-0,51%); – увеличение предела выносливости на 17% со 180 до 210 МПа; – увеличение степени дисперсности упрочняющих фаз и микротвердости (до 6,12-10,62 ГПа) на 10-19 %; – повышение износостойкости покрытия в 1,25-1,35 раза	– получение плотной структуры материала покрытия и остаточных напряжений сжатия; – выделение при ЭМО наноструктурных упрочнящих фаз на основе карбидов, боридов, силицидов; – повышение прочности соединения покрытия с основой на 10 % и более; – уменьшение газопроницаемости покрытия до нуля; – повышение предела выносливости на 14-18 % и более; – повышение износостойкости в 1,4 раза; – уменьшение припуска на шлифование до 0,03-0,05 мм

Рисунок 2 – Основные результаты исследований по влиянию модуляции электрических параметров плазменного нанесения и упрочнения покрытий на качество покрытий

Для обеспечения максимальной эффективности процессов комбинированной обработки необходима оптимизация всего комплекса управляемых (управляющих) факторов применительно к обработке конкретных деталей. Оптимизация каждой подгруппы управляемых факторов предполагает создание конструкций оборудования и оснастки, обладающих технологическими возможностями, необходимыми для эффективной реализации процессов комбинированной обработки.

Результаты исследований нанесения покрытий с модуляцией мощностей косвенной и прямой дуг плазмотрона

Результаты исследований по совершенствованию процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий путем модуляции параметров и последующего упрочнения покрытий термо- и электромеханической обработкой, представленные на рисунке 3, показали их эффективность [4, 6, 8]. В процессе нанесения покрытия она обеспечивается за счет модуляции электрических параметров как косвенной дуги плазмотрона, горящей внутри него между его электродами, так и выносной (прямой) дуги, горящей между электродом-соплом плазмотрона и электродом-деталью [9] (рис.3).



1 – плазматрон; *2* – подложка; *3* – источник питания; *4* – катушка индуктивности; *5* – балластное сопротивление; *6* – модулятор; *7* – блок управления; *8* – косвенная дуга; *9* – балластное сопротивление; *10*, *11* – модуляторы; *12* – блок управления; *13* – прямая дуга

Рисунок 3 – Принципиальная электрическая схема установки плазменного напыления-наплавки с модуляторами токов прямой и косвенной дуг

Импульсная модуляция мощности косвенной дуги позволяет генерировать ударные волны в плазменной струе (слабые в условиях проведенного экс-

перимента) и повысить энергоотдачу от плазменной струи к напыляемым частицам, тем самым увеличить их скорость интенсивность нагрева. Последнее приводит к улучшению физико-механических и триботехнических характеристик. Модуляция мощности выносной дуги позволяет точечно проплавлять покрытие на глубину до границы с основой и обеспечивать равномерность нагрева основы в масштабах всей ее поверхности. Это дополнительно приводит к улучшению качества покрытия.

Для деталей, работающих при повышенных ударных и знакопеременных нагрузках, надежность может быть повышена за счет термо- и электромеханической обработки, которые обеспечивают сплошность и равномерность структуры покрытия, высокие прочность, твердость и улучшение других характеристик. Совмещение процессов нанесения и упрочнения покрытий позволяет дополнительно повысить технологическую надежность получения покрытий и снизить количество брака.

Технологическое управление качеством плазменных покрытий

Управление качеством плазменных покрытий в технологических процессах традиционно осуществляется оптимизацией технологических параметров предварительной подготовки поверхности, режимов нанесения покрытия и его упрочнения, последующей обработки покрытия. На основании вышеизложенного 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 [4,8,10], либо путем последующей или совмещенной с нанесением термо- или электромеханической обработки покрытия [6, 10, 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 [6, 10]. 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. Второй принцип заключается в оптимизации концентрации количества локальных зон проплавления и обеспечении равномерности свойств покрытия в масштабе всей поверхности покрытия. Второй принцип реализуется с помощью регулирования частоты модуляции.

Термомеханическое упрочнение покрытий целесообразно проводить двухступенчатой обработкой [5]. На первой стадии обработка проводится при высоких температурах покрытия (> 1400 ºК). 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 транспортирующих машин и их конструктивные элементы (лопатки крыльчаток и колес компрессоров, шейки валов, гильзы цилиндров, стенки, опоры и др.) испытывают неодинаковые по уровню эксплуатационные нагрузки в различных рабочих зонах. С целью экономии трудоемкости и материальных ресурсов целесообразно создание закономерного изменения качества рабочих поверхностей, обеспечивающих их равномерный износ. Использование мо-

дуляции 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 последующей вибромеханической обработке это может быть реализовано программированием движения инструмента, обеспечивая необходимые типы и законы изменения микрорельефа поверхности. При электромеханической обработке это может быть выполнено путем автоматизированного изменения силы тока. 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.

Заключение

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:

− повысить прочность соединения покрытия с основой в 1,5-2 раза; увеличить твердость покрытия в 1,2-1,7 раз; понизить газопроницаемость покрытия в 4-10 раз; повысить износостойкость покрытия (в условиях изнашивания в абразивно-масляной прослойке – в 1,14-1,9 раз).

− получить покрытия с высокими физико-механическими и триботехническими свойствами при модуляции выносной дуги в гибридном процессе напыления-наплавки: повысить прочность соединения покрытия с основой 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; понизить пористость покрытий 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 и разработанных технологических рекомендаций возможно дальнейшее развитие технологии плазменного нанесения и упрочнения покрытий с использованием импульсной модуляции электрических параметров плазмотрона для различных типовых представителей деталей машин с учетом предъявляемых к ним эксплуатационных требований.

Библиографический список

1 Сухочев, Г. А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях [Текст] / Г. А. Сухочев. – М. : Машиностроение, 2004. – 287 с.

2 Кадырметов, А. М. Особенности процесса воздушно-плазменного нанесения и упрочнения покрытий [Текст] / А. М. Кадырметов, Г. А. Сухочев // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. – № 4(52). – С. 25-28.

3 Кадырметов, А. М. Обзор вопросов эффективности плазменного напыления [Текст] / А. М. Кадырметов, Е. В., Снятков, А. С. Пустовалов, Р. В. Мирзеханов // Воронежский научно-технический вестник. – 2016. – № 1 (15). – 14 с. Режим доступа:https://yadi.sk/i/eU59k8OIsKSTQ.

4 Сухочев, Г. А. Экспериментальные исследования параметров управляемости процесса воздушно-плазменного нанесения и упрочнения покрытий [Текст] / Г. А. Сухочев, А. М. Кадырметов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. – № 11(47). – С. 53-56.

5 Багмутов, В. П. Структура и механические свойства плазменных покрытий после электромеханической обработки [Текст] / В. П. Багмутов, В. И. Калита, И. Н. Захаров, С. Н. Паршев // Физика и химия обработки материалов. 2007. № 3. – С. 22-28.

6 Сухочев, Г. А. 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.

7 Соснин Н. А., Ермаков С. А., Тополянский П. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 406 с.

8 Кадырметов, А. М. Оборудование для плазменного нанесения и упрочнения покрытий с модуляцией электрических параметров [Текст] / А. М. Кадырметов, Д. И. Станчев, Г. А. Сухочев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 11(71). – С. 41-48.

9 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.

10 Кадырметов, А. М. Технология плазменного нанесения и упрочнения покрытий в ресурсосберегающих производственных процессах [Текст] / А. М. Кадырметов, Д. И. Станчев, Г. А. Сухочев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 7(67). – С. 29-36.

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