

УДК 621.793.74:621.791.927.55

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПЛАЗМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ
И УПРОЧНЕНИЕМ С МОДУЛЯЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ

Г. А. Сухочев¹, А. М. Кадырметов², А. Ф. Мальцев², А. С. Пустовалов²
ФГБОУ ВПО Воронежский государственный технический университет
ФГБОУ ВО Воронежский государственный
лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова

Современное состояние эксплуатации машин показывает, что около 30 % технологического оборудования занято в ремонтных производствах. Потери рабочего времени, затрачиваемого на ремонт сельскохозяйственной и дорожно-строительной техники, составляют 30-40 %, а количество работающих в сфере ремонта автомобилей в 4-5 раз превышает количество работающих при изготовлении автомобилей [1]. Практика деятельности промышленных предприятий и эксплуатации техники показывает, что более 80 % её отказов обусловлено износом деталей, при этом величина износа составляет всего лишь 0,3-1,0 мм, то есть доли процента от массы деталей, оставляя нереализованными их высокие остаточную стоимость и ресурс после восстановления изношенного слоя, экономию средств от закупки или изготовления новых запасных частей. В связи с этим во всем мире используют технологии восстановления геометрических размеров и физико-механических свойств поверхностей. Плазменные технологии в целом и плазменное напыление, в частности, относятся к прогрессивным технологиям восстановления и упрочения поверхностей [1].

Современное состояние технологий плазменного напыления и наплавки показывает наличие у них недостатков (низкую прочность напыленных покрытий и их соединения с основой, перегрев подложки при плазменной наплавке, ее коробление и высокие остаточные напряжения). Основной проблемой является устранение данных недостатков и обеспечение: при напылении – необходимых прочностных характеристик, минимальных или регулируемых остаточных напряжений и надежности покрытий; при наплавке – минимального термического влияния на основу, исключающего коробление основы и высокие остаточные напряжения в покрытиях и позволяющего их использование при динамических, в том числе ударных, и знакопеременных нагрузках.

Результаты проведенных в данной работе исследований свидетельствуют о возможности эффективного улучшения плазменных покрытий с помощью

использования методов динамизации параметров и, в частности, с помощью модуляции электрических параметров [2, 3], а также путем комбинированных и совмещенных процессов с вибромеханической, электроискровой обработкой, термо- и электромеханической обработкой и др. (рис. 1) [4, 5].

Технологические возможности процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий

В плазменном напылении модуляция электрических параметров является удобным технологическим методом, позволяющим просто регулировать электрические и энергетические характеристики дуг плазмотрона и, тем самым, эффективно управлять качеством покрытий [2, 3]. Модуляция электрических параметров плазмотрона заключается в наложении импульсов тока прямой и обратной полярности на средние токи косвенной и прямой дуг плазмотрона. Это приводит соответственно к импульсному увеличению или снижению мощности дуг.



Рисунок 1 – Основные результаты исследований по влиянию модуляции электрических параметров плазменного нанесения и упрочнения покрытий на качество покрытий

Для упрочнения плазменно напыленных покрытий из самофлюсующихся материалов традиционно используется их оплавление, однако оно имеет существенные недостатки, заключающиеся в повышенном тепловом воздействии на подложку, ее короблении, пониженном КПД процесса и невозможности использования для тонкостенных деталей. Более эффективной является плазменная наплавка по гибридной схеме, включающая в себя одновременное использование косвенной (горящей внутри плазмотрона между его электродами) и прямой (горящей между электродом плазмотрона и деталью) дуг плазмотрона [1].

Регулирование мощности указанных дуг позволяет уменьшить тепловую нагрузку на деталь при высоком качестве наплавки. Однако данный метод требует финишных операций для поверхностей деталей пар трения. 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 [4].

Электромеханическая обработка сопровождается высокими скоростями нагрева и охлаждения покрытий и в стальной основе приводит к формированию высокопрочной структуры сорбита. К современным известным прогрессивным технологическим методам упрочнения поверхностей и покрытий, позволяющим получить повышенное качество поверхности, также относятся плазменная закалка, модификация, финишное плазменное упрочнение и для поверхностей сложного профиля – комбинированная отделочно-упрочняющая обработка гранулированной токопроводящей средой [5]. В последнем случае комбинированная обработка образцов до и после нанесения покрытия проводится на струйно-динамических установках эжекторного типа с наложением тока низкого напряжения.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что во всех вариантах плазменного нанесения и упрочнения покрытий модуляция электрических параметров является удобным и эффективным методом технико-экономического обеспечения высокого качества покрытий. Максимальная эффективность процессов комбинированной обработки при этом осуществляется оптимизацией всего комплекса управляющих факторов применительно к обработке конкретных деталей и предполагает создание конструкций оборудования и оснастки, обладающих технологическими возможностями регулирования этих факторов.

Эффективность использования модуляции электрических параметров в процессах плазменного нанесения и упрочнения покрытий

Эффективность процессов плазменного нанесения обеспечивается за счет модуляции электрических параметров как косвенной дуги плазмотрона, горячей внутри него между его электродами, так и выносной (прямой) дуги, горячей между электродом-соплом плазмотрона и электродом-деталью [2, 3].

Импульсная модуляция мощности косвенной дуги дает возможность генерировать ударные волны в плазменной струе (слабые в условиях проведенного эксперимента), и за счет этого увеличивать коэффициенты лобового сопротивления частиц и их теплообмена с плазменной струей в 2 и более раз, до 30-50 % повышать температуру и скорость плазменной струи и напыляемых частиц [2, 3]. Такое повышение энергетического состояния частиц в момент удара о подложку приводит к улучшению триботехнических и физико-механических характеристик: увеличивается в 1,5 ... 2 раза прочность соединения покрытия с основой; 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 – в 1,14 ... 1,9 раз) [3].

Для выносной дуги модуляция ее мощности позволяет точно проплавливать покрытие в местах привязки к основе на глубину до границы с основой и обеспечивать равномерность нагрева основы в масштабах всей ее поверхности [2, 3], минимизируя термические и остаточные напряжения в деталях. Например, при традиционном нанесении плазменного покрытия на зубья ковшей экскаватора неравномерность нагрева в разных местах поверхности зуба достигает 500 °С. Модуляция электрической мощности выносной дуги позволяет снизить до 10-20 °С разброс температур на поверхности. При нагреве цилиндрической детали плазменной струей количество оборотов, при котором наступает тепловое насыщение детали, снижается с 8-10 оборотов для случая без модуляции до 2-3 оборотов при ее использовании. При этом неравномерность температур, например, шеек коленчатых валов со второго оборота не превышает 20-30 °С [2]. Дополнительно модуляция электрических параметров выносной дуги позволяет повысить физико-механические и триботехнические характеристики покрытий [2, 3]: повысить микротвердость – в 1,1 ... 1,2 раза, прочность соединения покрытия с основой в 1,15 ... 1,25 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.

Для деталей, работающих при повышенных ударных и знакопеременных нагрузках, надежность покрытий может быть повышена за счет термо- и элект-

тромеханической обработки, которая обеспечивает сплошность и равномерность структуры покрытия, высокие прочность и твердость, а также улучшение других характеристик [4] (рис. 1). Дополнительное повышение качества покрытий и снижение количества брака обеспечивается совмещением процессов нанесения и упрочнения покрытий.

Реализация технологического управления качеством плазменных покрытий

Полученные результаты исследований показали возможность эффективного управления качеством плазменных покрытий путем наложения импульсов силы тока на средние значения силы тока косвенной и прямой дуг в режиме модуляции электрических параметров [2-5], либо путем последующей или совмещенной с нанесением термо- или электромеханической обработки покрытия.

В качестве технологических параметров импульсной модуляции тока дуги плазмотрона используются частота модуляции и параметры импульсов – амплитуда, длительность, форма. 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 [2-4].

Методически выбор режимов нанесения и упрочнения покрытий включает в себя два этапа. На первом этапе находятся оптимальные области режимов без модуляции, на втором – выбор схемы и режимов модуляции.

Для плазменного напыления выбор режимов модуляции косвенной дуги основан на двух принципах. В первом принципе обеспечивается максимизация выделяемой энергии в каждом импульсе при минимально возможной его длительности, то есть реализуется максимизация 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.

Во втором принципе обеспечивается интенсификация 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).

Для выносной дуги поиск режимов модуляции также основывается на двух принципах. В первом случае создаются оптимальные амплитуды и длительности каждого импульса мощности, обеспечивающие локальные участки проплавления покрытия в зоне привязки дуги к основе до границы переходной зоны «покрытие-подложка» в моменты воздействия импульсов. Во втором случае оптимизируется концентрация количества локальных зон проплавления и обеспечивается равномерность свойств покрытия в масштабе всей поверхности покрытия. Этот принцип реализуется с помощью регулирования частоты модуляции.

Упрочнение покрытий термомеханическим воздействием целесообразно проводить двухступенчатой обработкой [2]: при высоких температурах покрытия (> 1400 °К) и последующей обработкой при нормальной температуре. 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 и рабочие органы строительно-дорожных, транспортирующих машин и их конструктивные элементы (шейки валов, гильзы цилиндров, лопатки крыльчаток и колес компрессоров, 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 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 последующей вибромеханической обработке это может быть реализовано программированием движения инструмента, обеспечивающим 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 отклонений факторов процесса нанесения и упрочнения плазменных покрытий.

Эксплуатационные и стендовые испытания деталей с плазменными покрытиями, нанесенными на рекомендованных режимах [2], показали, что износостойкость покрытий на шейках коленчатого вала, полученных с модуляцией косвенной и прямой дуги, в 1,2 ... 1,7 раза и более выше, чем таковая, полученная без использования модуляции дуг. Результаты испытаний покрытий, нанесенных комбинированным способом, показали, что износостойкость покрытий в данном случае является максимальной и превышающей износостойкость ненапыленных шеек и напыленных по технологиям с модуляцией выносной дуги при одновременной или последующей электромеханической обработке соответственно в 2,2-2,5; 1,2-1,4; 1,1-1,2 раза.

Библиографический список

1 Тополянский, П. А. Техническая политика в области внедрения процессов восстановления и упрочнения [Текст] / П. А. Тополянский // Ремонт в машиностроении, приборостроении. – 2008. – №11(100). – С. 47-51.

2 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.

3 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.

4 Кадырметов, А. М. Моделирование качества покрытий, полученных плазменным напылением с одновременной электромеханической обработкой [Текст] / А. М. Кадырметов, Г. А. Сухочев, А. Ф. Мальцев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – №8. – С. 39-43.

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