

УДК 621.793.74: 621.791.927.55

АНАЛИЗ СПОСОБОВ УПРОЧНЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

В. О. Никонов, А. М. Кадырметов, В. И. Посметьев

(ФГБОУ ВПО ВГЛТА)

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. 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.

К настоящему времени разработано большое количество разновидностей способов последующего упрочнения плазменных покрытий (ПП) представляющие собой комбинацию различных высокоэнергетических воздействий на поверхность обрабатываемой детали. Существующие способы обработки можно условно разбить на четыре группы: силовые, термические, термо-силовые и комбинированные (рис. 1).



Рисунок 1 – Способы упрочнения плазменных покрытий

Обкатка роликом или шариком производится как в холодном, так и в горячем состоянии. Суть упрочнения покрытия роликом состоит в том, что под действием обрабатывающего инструментального приспособления в поверхностном слое за счет действия деформирующей силы происходит пластическая деформация покрытия, его уплотнение, в результате которого заполняются по-

ры покрытия, происходят структурные изменения в кристаллической решетке, увеличивается износостойкость, создаются сжимающие остаточные напряжения повышающие сопротивление усталости [1].

Для повышения адгезии на ролик накладывают ультразвуковые колебания, способствующие ускорению возникновения условий для взаимной диффузии элементов порошкового покрытия в основу, увеличению прочности соединения. Несмотря на это ультразвук не нашел широкого распространения вследствие сложности и больших капитальных затрат на оборудование, включающего ультразвуковой генератор, преобразователь, систему циркуляции охлаждающей жидкости [2].

Недостатком обработки плазменных покрытий прецизионной поверхностной обкаткой является невозможность получения высокой плотности покрытия и вероятность его растрескивания при холодной деформации, особенно при использовании твердых порошковых материалов для покрытия, и невозможность достижения высокой адгезии на границе сцепления покрытия с основным металлом [3].

Таким образом, силовые способы упрочнения плазменных покрытий имеют недостатки, связанные с невозможностью получения высокой плотности покрытия и адгезии на границе сцепления покрытия с основным металлом.

Самым распространенным способом термического воздействия на покрытие является оплавление при помощи плазмотрона. Тем не менее, этот способ имеет существенные недостатки: неоднородность и окисление покрытия, разупрочнение материала основы, значительные температурные деформации [4].

Плазменное напыление покрытия с последующим его оплавлением электроэрозионным методом в режиме эрозии, с дальнейшим наращиванием основного слоя необходимого состава тем же электроэрозионным методом в режиме легирования, позволяет уменьшить шероховатость покрытия, повысить адгезионную и когезионную прочность, увеличить износостойкость поверхностного слоя. Покрытия, полученные этим способом, лучше, чем традиционные покрытия воспринимают ударные и знакопеременные нагрузки, прикладываемые к детали с покрытием. Тем не менее, данный способ имеет сложный технологический процесс, который делает данную технологию получения покрытия дорогостоящей и трудоемкой [5].

При оплавлении покрытий с помощью лазера проникновение тепла в основной металл невелико, поэтому нагрев лазером является пригодным для обработки покрытий на закаливаемых, термически обработанных деталях. Обработка лазером плазменно напыленных покрытий улучшает прочность соединения материала покрытия с основой и в комбинации с высокоскоростным охлаждением позволяет ре-

гулировать процессы структурообразования, фазообразования, диспергирования, а значит и свойства покрытий. Однако применение лазера для упрочнения поверхностей деталей сдерживается большими затратами на оборудование [6].

Импульсная высокоэнергетическая обработка плазменного покрытия мощным электронным пучком, обеспечивает сравнительно равномерный прогрев поверхностного слоя толщиной до 0,1 мм. Импульсное облучение плазменных покрытий мощным электронным пучком является эффективным методом термообработки покрытий, позволяющим осуществлять высокоскоростной нагрев (вплоть до полного перепада) и быстрое охлаждение порошкового покрытия без существенного нагрева основного материала подложки. С увеличением размера частиц напыляемого порошка эффективность нагрева слоя покрытия повышается [7].

Для оплавления плазменных покрытий на некоторых деталях применяют муфельные печи. Скорость нагрева деталей в электрических, газовых муфельных печах невелика, так как при нагреве детали постепенно понижается разность температур изделия и печи. При оплавлении с помощью деталь довольно быстро нагревается до требуемой температуры в сравнении с обработкой в печи, что сдерживает окисление поверхности и оплавления слоя. При сравнительно медленном нагреве детали в муфельной печи, особенно при высоких температурах, окисление защитного слоя и поверхности возрастает, что приводит к понижению качества покрытия. Для ускорения нагрева детали можно разогреть муфельную печь до температуры, значительно превышающую температуру плавления покрытия, однако это приведет к перегреву и расплавлению покрытия. Кроме этого неизбежны коробления и деформации деталей, требующие их последующего устранения [8].

Плазменное напыление покрытия с последующей обработкой токами высокой частоты до температуры 600-1400 °С и одновременным кратковременным формированием рабочей поверхности на автоматическом прессе при давлении 100-1000 кг/см² пуансоном заданной конфигурации обеспечивает получение прочного сцепления покрытия с поверхностью детали и позволяет исключить трудоемкую операцию шлифования рабочей поверхности. Недостатками данного способа являются: большие капитальные затраты на оборудование, низкий КПД процесса [9].

Сутью метода упрочнения плазменного покрытия под действием механического удара является то, что на нагретый слой воздействует динамическое давление вовлеченного в колебательный процесс пуансона [10]. Недостатком данного метода является наличие неуплотненных мест в покрытии после упрочнения, присутствие которых на поверхности раздела покрытие-подложка

снижает прочность их соединения.

Сущность магнитно-импульсного метода упрочнения плазменного покрытия состоит в том, что на материал покрытия через оболочку одновременно воздействуют магнитно-силовым и термическим полем. Недостатком, ограничивающим широкое применение данного метода, является необходимость создания для различной номенклатуры деталей новых оболочек, форма поверхности которых должна повторять форму восстанавливаемой поверхности [11].

Основой процесса электроимпульсной обработки плазменного покрытия является пластическая деформация и приварка напыленного покрытия к подложке с помощью мощных импульсов тока пропускаемых через медные ролики. Повышение прочности сцепления покрытия с основой выполняется за счет диффузионных процессов и образования участков микросварки. Недостатком процесса электроимпульсной обработки плазменных покрытий является сложное регулирование параметрами упрочнения [12].

Плазменное напыление с последующим горячим уплотнением напыленного слоя вращающимся накатным роликом обеспечивает повышение прочностных характеристик напыленного слоя, прочность сцепления последнего с основным металлом, значительное снижение энергетических затрат. Однако применение данного способа сдерживается вследствие значительных энергетических затрат [13].

Упрочнение покрытий с помощью 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. Известно, что упрочнение плазменных покрытий путем электромеханической обработки (ЭМО) наноструктурирует их и обеспечивает высокую износостойкость со свойствами на уровне монолитных материалов, уплотняет покрытия на 10-20 %, повышает микротвердость на 60-70 %, увеличивает адгезионную прочность до 3 раз [14].

Результаты исследований способа термомеханической обработки плазменных покрытий показали, что под действием температуры и приложенной нагрузки от ролика, материал покрытия в процессе термомеханического упрочнения растекается и заполняет поры. Происходит «залечивание» пор и как следствие увеличивается прочность соединения покрытия с основой и уменьшается газопроницаемость. Недостатком способа является невозможность по-

вышения адгезии на границе раздела покрытия с основным металлом [15].

Плазменное напыление покрытия с дальнейшей двухступенчатой термомеханической обработкой с промежуточным отжигом, позволяет повысить качества поверхностного слоя: увеличить плотность покрытия пор, прочность покрытия с основой, усталостную прочность и износостойкость. Несмотря на это данный способ имеет сложный технологический процесс и требует дорогостоящего оборудования [16].

Плазменное напыление с последующей послойной электроконтактной обработкой токопроводящим роликом при экспериментально установленных технологических режимах, силе прижима ролика, плотности тока и при соответствии ширины ролика диаметру основной зоны пятна напыления материала, позволяет добиться измельчения составляющих и гомогенизацию микроструктуры, снизить пористость до оптимального уровня, обеспечить частичное интеркристаллитное оплавление и образование дополнительных мостиков сварки между частицами покрытия, создающими эффект жесткого каркаса и повышающими когезионную прочность. Недостатками данного способа являются: возникновение в частицах изготавливаемой смеси порошковых материалов электроконтактной коррозии, снижающей коррозионную стойкость и антифрикционные свойства покрытия; напыление смеси порошков дает неравномерную структуру покрытия, обусловленную неравномерностью распределения компонентов смеси порошков в напыляемых слоях, что снижает качество покрытия, его антифрикционные свойства; при послойной электроконтактной обработке упрочняются только границы раздела подложка-покрытие и межслойные границы, а не весь объем покрытия, что не обеспечивает необходимую усталостную прочность, и, соответственно снижает срок службы изделия [17].

Методы, основанные на совершенствовании только одной операции (либо операции нанесения, либо операции последующего упрочнения) имеют следующие основные недостатки: пористость и невозможность существенного увеличения плотности покрытия, а также невозможность повышения адгезии на границе раздела покрытия с подложкой; остаточные напряжения в покрытиях и невозможность использования в ряде случаев упрочнения покрытий с толщиной более 0,4 мм вследствие их растрескивания; необходимость припуска покрытия и последующей чистовой операции для его снятия.

На основании этого существующие способы упрочнения покрытий используют одновременно с напылением. Комбинированные методы обработки покры-

тия за счет совмещения операций нанесения и упрочнения покрытий позволяют уменьшить время на обработку детали, подготовительно-заключительное время, сэкономить энергию, способствуют увеличению производительности и эффективности получения качественных покрытий. При этом основные достоинства отдельно взятых составляющих процессов остаются.

Плазменно-индукционный метод нанесения покрытия дает возможность повысить микротвердость покрытия. Недостатком метода являются невысокие механические свойства напыленных покрытий, в частности невысокая величина микротвердости, которые обусловлены фазово-структурными изменениями поверхности из-за большого времени ее нагрева около 45 секунд до указанной температуры вследствие малой потребляемой мощности индукционного устройства. Указанная мощность позволяет получить нагрев поверхности основы до заданной температуры после длительного воздействия на основу вихревыми токами, что приводит к прогреву всего объема основы изделия, а заодно и камеры муфеля за счет кондуктивной теплоотдачи [18].

Получение покрытий лазерно-плазменным методом позволяет устранить образование микротрещин в наносимых слоях, а также устраняет необходимость струйно-абразивной подготовки поверхности и обеспечивает металлический контакт с основой. Недостатками данного способа является низкая прочность сцепления покрытия с подложкой, поскольку подводимая энергия лазерного излучения поглощается плазменным потоком на 15-20 %, что и приводит к недостаточному нагреву частиц напыляемого материала [19].

Гибридный процесс плазменной наплавки-напыления, позволяет повысить качество покрытий по сравнению с плазменным напылением за счет проплавления покрытия при меньшем нагреве детали по сравнению с плазменной наплавкой. Недостатком способа является повышенная по сравнению с плазменным напылением тепловая нагрузка, наличие пористости, остаточных напряжений покрытия, а также необходимость припуска покрытия и чистовой операции для его снятия [20].

Плазменное напыление с одновременной обработкой покрытия ультразвуковыми колебаниями до момента начала его кристаллизации обеспечивает увеличение усталостной прочности, повышение адгезионно-когезионных характеристик покрытий, улучшение антифрикционных свойств покрытия. Недостатком способа являются большие капитальные затраты на оборудование [21].

Способ плазменного напыления с одновременным оплавлением выносной

электрической дугой характеризуется значительным вводом теплоты и высокой прочностью сцепления оплавленного слоя с подложкой за счет локального приваривания участков покрытий к поверхности детали, без перегрева материала обрабатываемой поверхности. Недостатком данного способа является неравномерность структуры покрытия, заключающаяся в чередовании зон локального расплавления и не оплавленного покрытия [22].

Способ плазменного напыления с одновременным оплавлением выносной модулируемой электрической дугой, заключается в дополнительном локальном подводе тепла в покрытие, в результате накладываемых импульсов и регулирующий температуру поверхности увеличением мощности импульсов на начальных и уменьшением на конечных участках нанесения покрытия на деталь. Данный способ повышает производительность процесса нанесения покрытия и его физико-механические свойства. Тем не менее, при упрочнении сложных поверхностей данным способом возникают трудности [23].

Таким образом, известные способы упрочнения покрытий имеют недостатки, связанные с ограниченными возможностями увеличения плотности плазменного покрытия, его прочности и повышенными энергозатратами. ЭМО плазменных покрытий относится к перспективным направлениям повышения их качества, позволяющие существенно увеличить прочностные и триботехнические характеристики покрытий.

Библиографический список

1 Кудинов, В. В. Нанесение покрытий плазмой [Текст] / В. В. Кудинов, П. Ю. Пекшев, В. Е. Белашенко и др. – М. : Наука, 1990. – 480 с.

2 Безбородов, В. П. Возможности метода ультразвукового нагружения при нанесении газотермических покрытий [Текст] / В. П. Безбородов, В. А. Клименов, В. Е. Панин, В. Л. Теплоухов // Ультразвуковые колебания и их влияние на механические характеристики конструкционных материалов : Сб. науч. тр. – Киев, 1986. – С. 46-49.

3 Прецизионная поверхностная обкатка полученных плазменным напылением металлических покрытий / Frackowiak Karl Heinz, Oswald Agnes // Schweiss. und Schneid. – 1992. – № 6. – С. 331-333. – нем.

4 Смирнов, В. Ю. Влияние способа оплавления на характер взаимодействия материала покрытия из ВСГН с титановой подложкой [Текст] / Ю. В. Смирнов, В. В.

Губченко // Теория и практика газотермического нанесения покрытий : Тез. докл. VIII всесоюзного совещания. – Рига, 1980. – Т. 1. – С. 146-148.

5 Патент на изобретение 1465226 СССР, МПК В23Р6/00, С23С28/00. Способ получения многослойных покрытий на восстанавливаемых деталях [Текст] / Л. И. Погодаев, Ю. В. Фролов, В. Б. Хмелевская, Ю. В. Баев, В. М. Легкий, Л. И. Привалова, В. Н. Сырцов ; заявитель и патентообладатель Ленинградский институт водного транспорта. – 4199904 / 27-27 ; заявл. 25.02.1987 ; опубл. 15.03.1989.

6 Шелягин, В. Д. Лазерная модификация плазменно нанесенных покрытий [Текст] / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, А. П. Грищенко, А. В. Сиора, А. В. Бернацкий // Вестник двигателестроения. Технология производства и ремонта. – 2009. – № 2. – С. 69-72.

7 Овчаренко, В. Е. Эволюция структуры плазменного металлокерамического покрытия при импульсной электронно-лучевой обработке [Текст] : Физика и химия обработки материалов, 2010, № 1, С 71-77.

8 Дихтябрь, В. П. Некоторые пути улучшения характеристик плазменно напыленного нихрома [Текст] / В. П. Дихтябрь, А. И. Муравьев, В. С. Лоскутов, А. Я. Ханин, Б. Н. Горшков, Ю. П. Кудрявцев // Теория и практика газотермического нанесения покрытий : Тез. докл. VIII всесоюзного совещания. – Рига, 1980 – Т. 2. – С. 27-30.

9 Патент на изобретение 429117, МПК С22С7/00, С22С29/00, В22F3/24. Способ изготовления изделия с износостойким покрытием [Текст] / М. М. Шустерняк, А. С. Ганцевич ; заявитель и патентообладатель – 1838055/22-1; заявл. 17.10.1972 ; опубл. 25.07.1974.

10 Браславский, В. М. Технология обкатки крупных деталей роликами [Текст] / В. М. Браславский. – М. : Машиностроение, 1975. – 160 с.

11 Малыгин, Б. В. Магнитно-импульсное упрочнение деталей машин и инструмента [Текст] / Б. В. Малыгин, И. А. Семерникова // Станки и инструмент. – 1989. – № 4. – С. 18-19.

12 Скворцов, В. В. Электроимпульсная обработка плазменно напыленных покрытий [Текст] / В. В. Скворцов, Б. Н. Журкин, В. И. Высоцкая // Электрофиз. методы и технол. воздействия на структуру и свойства мет. матер.: Всес. шк. – семин., сент., 1990. – Л., 1990. – С. 135-136.

13 Патент на изобретение 2199604, МПК С23С4/12, С23С4/18, В22F3/18, В05В7/22. Способ восстановления изделия и устройство для его осуществления [Текст] / А. В. Полетаев, И. В. Анисимов ; заявитель и патентообладатель Поле-

таев А. В., Анисимов И. В. – 2001109411/02 ; заявл. 06.04.2001 ; опубл. 27.02.2003.

14 Патент на изобретение 2338005, МПК С23С4/18, В23Н9/00. Способ комбинированного упрочнений поверхностей деталей [Текст] / В. П. Багмутов, В. И. Калита, С. Н. Паршев, И. Н. Захаров ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Волгоградский государственный технический университет – 2006145603/02 ; заявл. 20.12.2006 ; опубл. 27.06.2008.

15 Яковлев, К. А. Разработка процесса термомеханического упрочнения поверхностей с газотермическими покрытиями [Текст] : автореф. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / К. А. Яковлев. – Воронеж, 1998. – 15 с.

16 Бледнова, Ж. М. Формирование наноструктурированных поверхностных слоев плазменным напылением механоактивированных порошков из сплавов с ЭПФ [Текст] / Ж. М. Бледнова, П. О. Русинов // WWW.NANORF.RU. – 2010. – Том 5 – № 3-4 – С. 77-83.

17 Патент на изобретение 2079660, МПК F16C33/04. Способ получения антифрикционного покрытия на тонкостенных стальных вкладышах опор скольжения. [Текст] / Е. И. Кормышов, Г. А. Абрамов, Ю. Ф. Сычков, В. И. Володин, В. Б. Хмелевская, Л. И. Погодаев, Н. И. Захаров, А. И. Текучев ; заявитель и патентообладатель Судоремонтно-судостроительный завод им. Ленина в г. Астрахани. – 93050163/28 ; заявл. 04.11.1993 ; опубл. 10.04.1997.

18 Фомин, А. А. Плазменно-индукционное нанесение покрытий с улучшенными параметрами биосовместимости при изготовлении дентальных имплантантов [Текст] : автореф. ... канд. техн. наук: 05.09.10 / А. А. Фомин. – Саратов, 2008. – 17 с.

19 Хаскин, В. Ю. Комбинированное лазерно-микроплазменное нанесение керамических покрытия на сталь [Текст] / В. Ю. Хаскин // Доповіди національної академії наук України, – 2007. – № 8. – С. 99-102.

20 Соснин, Н. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров [Текст] / Н. А. Соснин, С. А. Ермаков, П. А. Тополянский. – СПб : Изд-во Политехн. Ун-та, 2008. – 406 с.

21 Патент на изобретение 2269687, МПК F16C33/14. Способ нанесения антифрикционного покрытия на стальные тонкостенные вкладыши подшипников скольжения [Текст] / Е. Д. Бланк, В. А. Герасимов, Р. В. Додон, В. Н. Слепнев, В. Н. Тимофеев, В. Б. Хмелевская ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов ПРОМЕТЕЙ. –

2004118213/11 ; заявл. 15.06.2004 ; опубл. 10.02.2004.

22 Пузряков, А. Ф. Модель процесса напыления с одновременным оплавлением плазменных самофлюсующихся покрытий выносной дугой [Текст] / А. Ф. Пузряков, В. А. Вахалин, И. Н. Соловьев, А. А. Пузряков, С. А. Семенова // Сварочное производство. – 1998. – № 3. – С. 14-15.

23 Патент на изобретение 2211256, МПК С23С4/12. Способ нанесения покрытия [Текст] / Д. И. Станчев, А. М. Кадырметов, А. В. Винокуров, В. Н. Бухтояров ; заявитель и патентообладатель Воронежская государственная лесотехническая академия – 2001115118/02 ; заявл. 04.06.2001 ; опубл. 27.08.2003.