

УДК 621.793.74

DOI: 10.34220/2311-8873-2021-4-4-94-101

К ВОПРОСУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ  
ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Кадырметов А.М., Снятков Е.В., Попов Д.А.,

Плахотин А.А., Радыгин К.А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Воронежский государственный  
лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»

E-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

**Аннотация:** В работе проведен анализ технологического оснащения комбинированного процесса получения многокомпонентных покрытий на основе плазменного нанесения в открытой атмосфере.

**Ключевые слова:** плазменное напыление, многокомпонентное покрытие, плазматрон, технологическое обеспечение, детали.

ON THE QUESTION OF TECHNOLOGICAL SUPPORT OF PLASMA  
SPRAYING PROCESSES OF MULTI-COMPONENT COATINGS

Kadyrmetov A.M., Snyatkov E.V., Popov D.A.,

Plahotin A.A., Radygin K.A.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Voronezh State Forestry University. G.F. Morozova»

E-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

**Summary:** The paper analyzes the technological equipment of the combined process of obtaining multicomponent coatings based on plasma spraying in an open atmosphere.

**Keywords:** plasma spraying, multicomponent coating, plasmatron, technological provision, machine parts.

**Состояние и актуальность плазменного нанесения и упрочнения  
многокомпонентных покрытий**

Использование прогрессивных плазменных технологий при нанесении покрытий на новые детали и при восстановлении изношенных деталей позволяет обеспечить их заданную износостойкость [1-4]. Это эффективно, прежде все-

го, в отношении деталей ДВС типа круглые стержни (коленчатый вал, распределительный вал, другие валы, клапан) и для полых цилиндров (гильз, ступиц колес, тормозных и др.). Для получения стабильности свойств покрытий в широком диапазоне температур в последнее время стали использовать многокомпонентные сплавы, включающие не менее 5 основных элементов в концентрациях от 5 до 35 атом. % с высокой степенью смешения элементов [5-14].

Всевозможные сочетания компонентов таких материалов и диапазон их свойств до сих пор не раскрыты [10]. Значительная часть исследований многокомпонентных материалов посвящена выяснению свойств сплавов и их микроструктурных параметров, но только малая часть публикаций отражает проблему методов получения. Среди них незначительная доля публикаций посвящена методам нанесения многокомпонентных покрытий с высокой степенью смешения компонентов. В свою очередь, методам получения многокомпонентных покрытий с высокой степенью смешения компонентов на основе плазменного напыления в открытой или контролируемой атмосфере посвящены единичные работы. Такие методы практически не исследованы.

Совершенствование плазменных технологий нанесения и упрочнения многокомпонентных плазменных покрытий и изучение влияния факторов на критерии процессов возможно путями, представленными в работе [15]. К таким путям относятся динамизация процессов модуляцией параметров [16] и комбинирование процессов с использованием вибромеханической, электромеханической обработки и др. [17-23].

### **Технологическое обеспечение процессов плазменного напыления многокомпонентных покрытий**

Цель технологического обеспечения плазменного напыления и упрочнения многокомпонентных покрытий включает оптимизацию конструктивно-технологических решений в создании деталей с такими покрытиями с экстремальными свойствами и / или заданными свойствами и высоким технико-экономическим эффектом. Критериями оптимизации являются параметры качества покрытий, затраты на их получение и надежность технологии [24]. Достижение цели состоит в определении прогнозной оценки осуществления технологии получения многокомпонентных покрытий с высокой степенью смешения компонентов на основе плазменного напыления в условиях открытой или контролируемой атмосферы и технологических проектных решений подготовки смеси напыляемого материала.

Прогноз возможности реализации перспективных процессов нанесения многокомпонентных покрытий осуществляется созданием задела научно-технических разработок получения покрытий проведением исследований, включая анализ информации и теоретическую проработку, а также проведение экспериментальных исследований по перспективным конструкторско-технологическим решениям [25].

Технологическое обеспечение проектирования технологических процессов плазменного нанесения многокомпонентных покрытий включает в себя научно-исследовательские и опытно-технологические работы. Данные работы содержат: поиск решений проблем конструктивно-технологического плана; документальную формализацию выявленных решений данных проблем; выбор и оценку конструктивно-технологических решений получения покрытий; экспериментальные работы по обоснованию выбранных конструктивно-технологических решений; оформление результатов в виде отчета [25].

Основу конструктивно-технологических решений составляет технологическое оснащение – оснастка и оборудование.

#### **Технологическое оснащение подготовки смеси компонентов напыляемого материала**

Подготовка смеси порошков компонентов заключается в равномерном перемешивании компонентов и включает этапы: сушка каждого порошка в печи при температуре  $\sim 100$  °С в течение 1 ч, его просеивание через вибросита для обеспечения нужной фракции, смешивание, окончательная сушка в печи при температуре  $\sim 100$  °С и просеивание перед напылением.

Сложность представляет процесс перемешивания составляющих порошков, имеющих значительное различие по плотности и приводящее к сепарации легких фракций. Для решения этой проблемы существуют подходы механического, газодинамического и комбинированного смешивания. Механический подход состоит в придании порошковой смеси нескольких степеней свободы движения, включая вращательные и поступательные движения. Примером является смеситель порошков С2.0 «Турбула». Газодинамический подход состоит в закручивании струй с порошками в емкости таким образом, чтобы струи с легкими порошками закручивались около стенки емкости, а струи с более тяжелыми порошками закручивались ближе к оси емкости. Это дает возможность последним за счет центробежной силы двигаться к пристеночным потокам и смешиваться с более легкими частицами порошка.

### **Технологическое оснащение процесса плазменного нанесения многокомпонентного материала**

Для защиты напыляемого материала от внешней среды при напылении используется газодинамический метод создания кольцевой струйной завесы контролируемой средой (азотной, аргоновой, др.) с помощью насадки на плазмотрон. Равномерность распределения компонентов в покрытии при напылении реализуется либо напылением ранее перемешанного в смесителе состава порошков, либо подачей составляющих порошков в отдельности через свои каналы в сопле плазмотрона. Последний вариант является наиболее приемлемым и удобным в управлении, но конструктивно и технологически самым сложным ввиду необходимости использования нескольких порошковых питателей. Наиболее оптимальным представляется вариант подачи двух смесей порошков через два канала в сопле плазмотрона в доанодную и заанодную части тугоплавкой и легкоплавкой смесей соответственно.

Для создания более равномерной структуры более предпочтительным вариантом является плазменная наплавка многокомпонентной смеси двухдуговым плазмотроном, в которой прямая дуга дополнительно оплавляет нанесенный слой покрытия. Промежуточный вариант занимает процесс двухдугового плазменного напыления с импульсной модуляцией мощностей дуг [3, 4, 25].

### **Технологическое оснащение процесса диспергирования многокомпонентного покрытия**

Для диспергирования нанесенного покрытия используется, прежде всего, тепловая энергия. В открытой атмосфере наиболее эффективно для этого использование высокоэнергетических концентрированных источников тепла – лазерного луча и / плазменной струи. Кратное переплавление покрытия с их помощью предположительно позволяет смешать компоненты покрытия до атомарного уровня при отсутствии перегрева детали при её технологически оптимальном охлаждении.

Дополнительное использование механической энергии с помощью электромеханической обработки параллельно или последовательно с оплавлением покрытия позволит интенсифицировать диспергирование состава покрытия. Предпосылками возможности гомогенизации состава покрытия являются высокая скорость охлаждения сплава в покрытии с помощью импульсной модуляции мощностей плазменной и электромеханической обработки покрытия.

### **Общие вопросы технологического оснащения плазменного нанесения**

## покрытий

Вариантом оснащения оборудованием включает установки: плазменного напыления и наплавки, электромеханической обработки и специальные приспособления [15, 19, 21]. Установка ПН (АС № 1774828 СССР, патенты РФ № 2480533, № 2211256) позволяет модулировать электрическую мощность дуг одно- и двухполярными импульсами [25].

Традиционным специальным технологическим оснащением для плазменного напыления на шатунные шейки коленчатых валов является центросместитель. Для уменьшения подготовительно-заключительного времени нанесения покрытия с электромеханической обработкой может использоваться устройство по патентам РФ №2085301, № 2447951, № 129021 [26]. Установ вала на станок с помощью данного устройства осуществляется один раз для всех шеек, а для любой шатунной шейки установ осуществляется также один раз для напыления и обкатки.

На кулачки распределительного вала покрытие наносится с помощью устройства копирного типа [27]. Постоянство дистанции напыления до поверхности кулачка обеспечивается технологическим кулачком-копиром, по которому перемещается штанга штока плазмотрона.

Для плазменной наплавки клапанов двигателя внутреннего сгорания используются установки, содержащие охлаждающую опору-вращатель клапана и колебатель плазмотрона [28].

Современный гибридный процесс плазменной наплавки-напыления [19] реализуется на установках нового поколения, примером которой является установка компании НПФ «Плазмацентр» [29, 30]. Данный процесс в зарубежной литературе называется *plasma transferred arc process* (РТА-процесс). Он одновременно задействуют основную и косвенную дуги.

Внутренняя изношенная поверхность цилиндров может быть восстановлена плазменным напылением по классической схеме, когда цилиндр вращается, а плазмотрон совершает поступательное движение. Для этого используется удлиненная штанга-держатель плазмотрона. Но предпочтительней является схема вращающегося с поступательным перемещением плазмотрона, которая позволяет наносить покрытие, не вынимая цилиндра из блока, а также наносить покрытие на безгильзовые блоки [25].

Данная схема напыления может быть эффективна для использования также и для таких деталей, как ступица колеса, чашка дифференциала, картер подшипников ведущей шестерни главной передачи, крышка подшипника ве-

дущего вала коробки передач и заднего моста, тормозной цилиндр, ступица ведомого диска сцепления, муфта подшипника выключения сцепления.

### Заключение

Составляющие процесса плазменного напыления многокомпонентного покрытия с его кратным оплавлением и электромеханической обработкой представляют возможность образования и сохранения в нем высокой степени смешения компонентов до уровня образования твердого раствора замещения как непосредственно после кристаллизации напыленного слоя, так и при последующей его электромеханической или лучевой обработки.

Восстановление деталей типа вал с профильными поверхностями, а также деталей типа цилиндр и др. при использовании технологического оснащения повышает эффективность восстановления изношенных поверхностей. Для реализации плазменного нанесения и упрочнения покрытий имеются и разработаны специальные средства технологического обеспечения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Восстановление автомобильных деталей : Технология и оборудование : Учеб. для вузов / В. Е. Канарчук, А. Д. Чигиринец, О. Л. Голяк, П. М. Шощкий. – М. : Транспорт, 1995. – 303 с.

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

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

4 Кадырметов, А. М. Современные технологии плазменных и газотермических процессов нанесения покрытий в открытой атмосфере / А. М. Кадырметов, Ю. Э. Симонова, А. А. Плахотин, Д. В. Колмаков // Современные материалы, техника и технология : сборник научных статей 9-й Международной научно-практической конференции (28 декабря 2019 года) / Юго-Зап. гос. ун-т.; в 2-х томах. Том 1. – Курс : Юго-Зап. гос.ун-т, 2019. – С. 226-238.

5 B. Cantor, and others, Mater. Sci. Eng. A, 375, (2004) 213-218.

6 F. Otto, and others, Acta Mater., 61, (2013) 2628-2638.

7 Yeh Jien-Wei, Chang Shou-Yi, Hong Yu-Der, Chen Swe-Kai, Lin Su-Jien. Anomalous decrease in X-ray diffraction intensities of Cu–Ni–Al–Co–Cr–Fe–Si alloy systems with multi-principal elements // Materials Chemistry and Physics. – 2007. V. 103. – P. 41–46.

8 Карпець, М. В. Влияние содержания никеля на износостойкость литого высокоэнтропийного сплава VCrMnFeCoNi<sub>x</sub> / М. В. Карпець, В. Ф. Горбань, О. М. Мисливченко, С. В. Марченко // Современная электрометаллургия. – 2015. – №1. – С. 56–60.

9 J.W. Yeh, S.K. Chen, S.J. Lin, J.Y. Gan,; T.S. Chin, T.T. Shun, C.H. Tsau, S.Y. Chang, Adv. Eng. Mater., 6, (2004) 299-303.

10 J.W. Yeh, Annales de Chimie Science des Matériaux, 31, (2006) 633 648.

11 Y. Zhang, and others, Progr. Mater. Scien., 61, (2014) 1-93.

12 Ming-Hung Tsai, Entropy, 15, (2013) 5338-5345.

13 Daniel B. Miracle and others, Entropy, 16, (2014) 494-525.

14 Z.P. Lu, H. Wang, M.W. Chen, I. Baker, J.W. Yeh, C.T. Liu, T.G. Nieh, Intermetallics, 66, (2015) Pages 67-76.

15 Кадырметов, А. М. Обзор вопросов эффективности плазменного напыления / А. М. Кадырметов, Е. В., Снятков, А. С. Пустовалов, Р. В. Мирзаханов // Воронежский научно-технический вестник. – 2016. – № 1 (15). – 14 с. – Библиогр.: с. 12. Режим доступа:<https://yadi.sk/i/eU59k8OIsKSTQ>.

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

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

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

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

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

21 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.

22 Кадырметов, А. М. Технология плазменного нанесения и упрочнения покрытий в ресурсосберегающих производственных процессах / А. М.

Кадырметов, Д. И. Станчев, Г. А. Сухочев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 7(67). С. 29-36.

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

24 ГОСТ Р 50995.0.1-96. Технологическое обеспечение создания продукции. Основные положения.

25 Тимохова, О. М. Вопросы технологического обеспечения плазменного напыления и упрочнения покрытий деталей машин [Электронный ресурс] / О. М. Тимохова, А. М. Кадырметов, Е. В. Снятков, В. Л. Махонин // Воронежский научно-технический вестник. – 2017. – Т. 4, № 4 (22). – С. 16-31. Режим доступа : <http://vestnikvgtla.ru/arhiv/2017/4-22-2017/16-31.pdf>.

26 Кадырметов, А. М. Манипуляторы, используемые для плазменного напыления коленчатых валов / А. М. Кадырметов, В. Н. Бухтояров, А. И. Веневцев // Энергоэффективность автотранспортных средств : нанотехнологии, информационно-коммуникационные системы, альтернативные источники энергии : материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 4-7 июня 2019 года. – Воронеж, 2019. – С.40-44.

27 Кадырметов, А. М. Восстановление и упрочнение сложнопрофильных поверхностей / А. М. Кадырметов, Р. В. Мирзеханов, В. Н. Бухтояров // Воронежский научно-технический вестник. – 2018. – Т. 1, № 1 (23). – С. 4-8. Режим доступа : <http://vestnikvgtla.ru/arhiv/2018/1-1-23-2018/4-8.pdf>.

28 Тимохова, О. М. Восстановление клапанов двигателей внутреннего сгорания плазменной наплавкой и напылением с модуляцией параметров / О. М. Тимохова, А. М. Кадырметов, Е. В. Снятков, В. В. Романов // Воронежский научно-технический вестник. – 2018. – Т. 1, № 1 (23). – С. 53-67. Режим доступа : <http://vestnikvgtla.ru/arhiv/2018/1-1-23-2018/53-67.pdf>.

29 Тополянский, П. А. Новое поколение установок для порошковой плазменной наплавки-напыления (процесс РТА) [Электронный ресурс] / П. А. Тополянский, С. А. Ермаков, А. Ю. Смирнов, Н. А. Соснин / Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки : Материалы 5-й Междунар. практ. конференции-выставки, проходившей 8-10 апреля 2003 г. : СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2003 (Шифр статьи R03-06).

30 Установка для плазменной порошковой наплавки – напыления клапанов (РТА-процесс) / Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки : В 2 ч. – Часть 2 : Материалы 9-й Междунар. практ. конф. : СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – С. 391.