

крытий из тугоплавких соединений и оксидов; вакуумно–плазменные, магнетронные, газотермические покрытия; химические и электрохимические методы; наплавка электрической дугой; газопламенная, центробежная, диффузионная наплавки; приварка листовых вставок; восстановление погружением заготовки в расплав присадочного материала; электроконтактная приварка металлического слоя (ленты, проволоки, порошковых материалов); термическая и химико–термическая обработка и другие.

При восстановлении быстроизнашивающихся деталей основными факторами, влияющими на их работоспособность являются все виды механической, термической, упрочняющей и финишной обработки при их изготовлении, приемы, способы, точность получение деталей и заготовок, правильность сборки, регулирования, приработки и испытания узлов, агрегатов и машин.

**Заключение.** Проанализированы современные методы ремонта соединений и устранения неисправностей, подробно рассмотрены способы восстановления и упрочнения деталей машин, показана перспективность их применения.

### Литература

1. Балабанов В.И. Все о присадках и добавках. – М.: Эксмо, 2008. – 240 с.
2. Харламов Ю.А., Будагьянц Н.А. Основы технологии восстановления и упрочнения деталей машин. Том 1. – Луганск: Изд–во Восточно–украинский национальный университет им. В. Даля, 2003. – 496 с.
3. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильющенко и др. – Минск: Беларуская навука, 1998. – 583 с.

УДК 621.793

## ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ МЕТОДАМИ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

В.А. Оковитый, канд. техн. наук  
Белорусский национальный технический университет  
(г. Минск, Республика Беларусь)

**Введение.** Плазменные покрытия и технологии их нанесения являются одним из прогрессивных, динамически развивающихся направлений по созданию поверхностных слоев с высокими защитными и упрочняющими свойствами. Их применение способствует увеличению ресурса работы и надежности, снижению материалоемкости ответственного оборудования и позволяет восстанавливать быстроизнашиваемые детали. Среди методов плазменного напыления, покрытия, полученные воздушной плазмой, благодаря формированию быстрозакаленных и метастабильных структур, универсальности, доступности и сравнительной дешевизны, представляет наибольший интерес для получения покрытий на различных деталях машин и оборудовании. Помимо этого плазменное напыление на воздухе все чаще рассматривается в качестве способа формирования аморфных, нанокристаллических, сверхпроводящих и других специальных

покрытий. Однако широкое использование плазменных покрытий сдерживается рядом факторов: недостаточной прочностью, высокой пористостью, неоднородностью структуры и свойств покрытий. Вместе с тем эффективность покрытий может быть существенно повышена путем модифицирования их структуры при последующей высокоэнергетической обработке нанесенных материалов. Высокоэнергетические источники энергии имеют свои особенности и преимущества при обработке плазменных покрытий: высокая концентрация подводимой энергии и локальность позволяют обрабатывать необходимый участок покрытия без нагрева всего объема и нарушения его структуры и свойств; возможность управления параметрами воздействия обеспечивает регулирование структуры обрабатываемого слоя, его твердости, шероховатости, износостойкости, геометрических размеров приводит к значительному уплотнению обрабатываемого слоя покрытия, устраняет пористость, снижает шероховатость. Однако следует учитывать, что высокоэнергетическая обработка приводит к перераспределению и изменению напряжений в покрытии, тем более существенному, чем выше мощность излучения и меньше толщина покрытия, поэтому требуется серьезная оптимизация режимов обработки. Актуальность высокоэнергетической обработки плазменных покрытий подтверждается большим количеством работ по данной тематике.

**Перспективы использования плазменного напыления для получения биокерамических покрытий.** В последние годы в мировой практике широко применяются имплантаты из биокерамических материалов, рассчитанные на длительное пребывание в живом организме. Преимуществом указанных имплантатов перед традиционными, изготовленными из титана и нержавеющей сталей, является долговременная фиксация в организме. В последние годы в США, Японии, Швеции, ФРГ и других развитых странах широко используется процесс плазменного напыления биокерамики на поверхность металлических имплантатов [1]. Особенностью таких конструкций является сочетание механической прочности металлических имплантатов с биологическими особенностями биокерамических покрытий. Это создает перспективы для их широкого клинического применения. При напылении биоактивных материалов на поверхность имплантатов наиболее часто используют гидроксиапатит  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  в смеси с биоинертными или другими материалами ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  и др.) [2]. Выбор гидроксиапатита в качестве основы обусловлен тем, что он обладает максимальным сродством с минеральной основой кости. В НИИПМ, ИОНХ и БНТУ разработаны материалы и технология плазменного напыления покрытий на основе гидроксиапатита с повышенными механическими характеристиками. Содержание гидроксиапатита в покрытии не менее 80 %. Толщина – 50–90 мкм. Повышение механических характеристик, отсутствие трещин, прочная связь с основой (до 40 МПа) достигнуты за счет оптимального выбора режимных, технологических и конструктивных параметров процесса напыления. Покрытие имеет достаточно развитую поверхность, плотное прилегание к основе, отсутствуют микротрещины. Проектирование плазменных биокерамических покрытий с заданными свойствами обуславливает необходимость по-

иска критериев подбора компонентов по физико-химическим, тепловым, механическим, технологическим и другим свойствам. Можно выделить следующие положения разработки и исследования биокерамических покрытий: состав покрытия не должен содержать токсичных компонентов; покрытие должно обладать высокой химической стойкостью и не изменять рН жидкости организма; обеспечивать сплошность материала; температурный интервал получения композиционного покрытия должен совпадать с областью термической стабильности и биологической активности фосфатов кальция; биокерамическое покрытие должно иметь композиционное строение с градиентным изменением коэффициента термического расширения по слоям покрытия, плотный наружный слой с максимальным содержанием кристаллической фазы гидроксиапатита и слой, прилегающий к основанию имплантата с определенной пористостью и максимальным содержанием аморфной фазы гидроксиапатита. Структура и фазовый состав плазменно напыленных ГА покрытий могут быть изменены при высокоэнергетическом воздействии.

**Разработка плазменных теплозащитных покрытий.** Бурное развитие в последние годы конструкционной керамики в значительной мере определило возросший интерес к промышленному использованию керамических покрытий, прежде всего в области высоких температур – высокопрочных и коррозионно-стойких при температуре более 1470 К, износостойких при температуре 1070 К [1]. При этом, наиболее существенный и впечатляющий прогресс достигнут в области создания систем теплозащитных покрытий для деталей газотурбинных двигателей (ГТД). Приоритетным направлением увеличения мощности и эффективности работы современных ГТД является увеличение температуры и давления рабочего газа, образуемого при сжигании топлива. Среди большого количества решаемых задач одной из основных является проблема новых материалов, способных противостоять воздействию высокотемпературных газовых сред. Эффективным ее решением служит применение в конструкциях серийных и новых двигателей теплозащитных покрытий (ТЗП). Основное назначение ТЗП на деталях газотурбинных двигателей – это создание тепловых барьеров, снижающих температуру металлической поверхности в процессе эксплуатации. В результате ТЗП позволяют либо увеличить рабочие температуры газа и тем самым увеличить мощность двигателя, либо снизить потери мощности в турбине путем снижения расхода охлаждающего ее детали воздуха. В настоящее время решается задача усовершенствования ТЗП до такой степени, чтобы их можно было использовать для лопаток турбин в горячих отсеках ГТД, а также для работы в продуктах сгорания низкокачественного топлива. Основным методом, используемым для нанесения теплозащитных покрытий из диоксида циркония, является плазменное напыление (до 90 % разработок) [3], прежде всего вследствие его высокой производительности и универсальности, позволяющей наносить металлическое и керамические материалы заданного химического и фазового состава. В общем случае ТЗП представляет собой многослойную систему, включающую металлический подслой, внешний керамический слой и переходные керамические слои. Основной причиной разрушения плазменных ТЗП яв-

ляется термомеханические напряжения, возникающие при теплосменах в двигателях, вследствие рассогласования термического расширения металла основы и керамического слоя, а также неравномерности распределения температурного поля в покрытии. Термомеханические напряжения усугубляются действием остаточных напряжений, возникающих в покрытии при напылении, и ослабляются эффектами пластичности и ползучести, реализующимися в металлическом подслое. Значительная структурная чувствительность свойств покрытий на основе диоксида циркония требует строгой воспроизводимости результатов. Кроме того, предъявляют дополнительные требования к конструкции изделий с покрытием. На основании изложенного можно сделать вывод о том, что разработка технологических процессов плазменного напыления ТЗП на детали газотурбинных двигателей является важной народнохозяйственной задачей. Ее выполнение требует решения комплекса проблем, связанных с изучением и разработкой методов регулирования свойств материалов, технологий их напыления и последующей обработки, созданием автоматизированного оборудования для нанесения покрытий, а также необходимыми изменениями конструкций изделий. В НИИПМ и БНТУ проведен большой комплекс исследований по разработке материалов и технологий для нанесения ТЗП. Изучено влияние метода, получения химического состава, параметров процесса напыления частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСДЦ) на технологические характеристики ТЗП. Для обеспечения высокой термостойкости плазменных покрытий из ЧСДЦ их структура должна содержать более 90 объемных процентов тетрагональной фазы (t)  $ZrO_2$  и менее 10 объемных процентов моноклинной (m); содержание  $Y_2O_3$  в порошке ЧСДЦ должно быть на уровне 7 % объемных. Разработана конструкция ТЗП, включающая в себя: верхний керамический слой на основе  $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ , толщиной 200–250 мкм; промежуточный керамический слой ( $NiCrAlY-(ZrO_2-Y_2O_3)$ ), толщиной 300–350 мкм, который представляет собой градиентное покрытие, состоящее из 3 слоев, с постепенным увеличением керамической составляющей (20; 50; 80%) в направлении от подложки к керамическому слою; подслою  $NiCrAlY$ , толщиной 100–150 мкм. Постепенное изменение микроструктуры, без резких границ раздела, равномерное изменение микротвердости и сближение модулей упругости керамического и металлического слоев приводит к увеличению прочности сцепления в 1,5–1,8 раза и термостойкости в 1,2–1,3 раза. Исследовано влияние термической обработки ТЗП импульсным и непрерывным  $CO_2$ -лазерами [5]. Установлено, что закономерности изменения структуры при использовании непрерывного и импульсного лазера одни и те же, а способы различаются силой воздействия, и, в первую очередь, характером образования трещин при снятии термических напряжений. После обработки импульсным лазером в покрытии образуется сильно измельченная структура, исчезает моноклинная модификация  $ZrO_2$ , фактически получается 100% объемных тетрагональная модификация. Происходит выравнивание концентрации оксида иттрия в объеме покрытия, что связано, в первую очередь, с быстрым охлаждением покрытия после лазерной обработки, которое подавляет диффузионные процессы, приводящие к перераспределению оксида

иттрия. Конструкция трансформированного слоя при обработке импульсным  $\text{CO}_2$ -лазером более предпочтительна для назначения ТЗП. Разработаны технологические процессы плазменного напыления ТЗП на детали газотурбинных двигателей.

**Износостойкие плазменные покрытия на основе композиционных самозмазывающихся материалов.** Свойства и эффективность плазменных износостойких покрытий во многом зависят от их структуры, которая формируется путем выбора исходных материалов, а также в процессе напыления и последующей обработки нанесенных слоев. В настоящее время в качестве исходных материалов получили распространение композиционные порошки и смеси порошков, которые позволяют варьировать состав и структуру покрытий в широких пределах. Важным этапом в достижении необходимых свойств покрытий является оптимизация режимов их напыления. Что касается последующей обработки напыленных слоев, то наиболее изучены технологии оплавления покрытий из самофлюсующихся сплавов с использованием газового пламени и нагрева токами высокой частоты. Вместе с тем для этих технологий характерен перегрев отдельных участков покрытия с нежелательным укрупнением структурных зерен металла, возможно существенное тепловое воздействие на основной материал изделия с изменением его свойств, затруднено управление структурой и свойствами обрабатываемого покрытия. Указанные недостатки исключаются при оплавлении напыленных слоев высококонцентрированными потоками энергии (плазма, импульс плазмы, электронный и лазерный лучи) с уровнем удельной мощности от  $10^3$  до  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Однако механизм упрочнения и управления структурой и свойствами напыленных слоев при такой термообработке покрытий изучен недостаточно, о чем свидетельствуют отечественные и зарубежные публикации [4]. Данное утверждение относится прежде всего к покрытиям из композиционных материалов с гетерогенным фазовым составом. Вместе с тем упомянутые покрытия, в частности с компонентами твердой смазки, находят все более широкое применение. Учитывая вышеизложенное, в НИИПМ и БНТУ проведен большой комплекс исследований по разработке материалов и технологий для нанесения износостойких плазменных покрытий на основе композиционных самозмазывающихся материалов. Исследованы и оптимизированы технологические параметры плазменного напыления разработанных композиционных порошков  $\text{NiCr/FeCr/FeCrMo}+\text{MoS}_2/\text{CaF}_2/\text{графит}+\text{TiC}$ , перспективных для формирования износостойкой структуры рабочих поверхностей деталей, эксплуатирующихся при неблагоприятных условиях трения (граничная смазка, повышенные контактные нагрузки и температуры). Исследованы и оптимизированы технологические параметры упрочняющей обработки с использованием высококонцентрированных потоков энергии импульсов плазмы для износостойких покрытий на основе композиционных порошков карбид – твердая смазка [5]. Обработку осуществляли импульсами плазменной струи с различной концентрацией энергии, возрастающей от поверхности покрытия к подложке, для сочетания в покрытиях поверхностных структур повышенной износостойкости и граничных с подложкой структур с упрочненными

ми когезионными и адгезионными связями. Критерием оптимизации служили для поверхностных слоев получение пористости 4–5%, для обеспечения высокой маслоудерживающую способность нанесенного износостойкого материала. При оптимизации параметров обработки граничных с подложкой слоев покрытий показана целесообразность использования следующих критериев: получение структур с минимальной пористостью и максимальным содержанием аморфной фазы (путем увеличения энергетического уровня импульсного воздействия); отсутствие признаков разрушения покрытий (путем ограничения чрезмерного увеличения энергетического уровня импульса). После обработки имеет место достаточно равномерное распределение пор, твердой фазы TiC, компонентов MoS<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub> и графита, что способствует увеличению износостойкости покрытий в условиях трения при граничной, несовершенной смазке. В сравнении с необработанными материалами микротвердость поверхностных слоев за счет уплотнения и аморфизации структуры увеличилась на 20–60 %. Это свидетельствует об упрочнении слоев с возрастанием их способности сопротивляться механическому изнашиванию. Максимальная микротвердость как правило наблюдалась на глубине 80–100 мкм, что, очевидно, обусловлено процессами ударноволновых воздействий импульсами плазменной струи, вызывающими упрочнение наклепом, а также процессами образования термических и структурных напряжений.

### Литература

1. Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А.Ф.Ильющенко, В.А.Оковитый, С.П.Кундас, Б.Форманек. – Минск: Беспринт, 2002. – 480 с.
2. Плазменные покрытия на основе керамических материалов / А.Ф.Ильющенко, В.А. Оковитый, А.И.Шевцов. – Минск: Беспринт, 2006. – 316 с.
3. Теплозащитные покрытия на основе ZrO<sub>2</sub> / А.Ф. Ильющенко, В.С.Ивашко, В.А.Оковитый, С.Б.Соболевский. – Минск: Ремика, 1998. – 128 с.
4. Формирование износостойких плазменных покрытий на основе композиционных самосмазывающихся материалов / А.Ф.Ильющенко, В.А. Оковитый, А.И.Шевцов. – Минск: Беспринт, 2005. – 253 с.
5. Высокоэнергетическая обработка плазменных покрытий / А.Ф.Ильющенко, В.А. Оковитый, А.И.Шевцов. – Минск: Беспринт, 2007. – 246 с.