

ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

УДК 621.791:621.793

Ф.И. Пантелеенко, В.А. Оковитый, О.Г. Девойно, А.Ф. Пантелеенко
(Белорусский национальный технический университет, г. Минск),
А.И. Шевцов (ГНУ "Институт порошковой металлургии" НАН Беларуси),
В.Ю. Блюменштейн (Кузбасский государственный
технический университет, г. Кемерово)
E-mail: panteleyenkofi@mail.ru

Методика разработки комбинированных упрочняющих технологических процессов

Предложена методика разработки комбинированных упрочняющих технологических процессов на примере плазменного напыления с последующей высокоэнергетической обработкой. Это позволяет сформировать требуемую структуру и эксплуатационные свойства покрытия.

Ключевые слова: упрочнение, восстановление, комбинированный технологический процесс, плазменное напыление, высокоэнергетическая обработка (плазменная, лазерная), износостойкое покрытие, наклеп, композиционные порошки.

The method of designing of combined hardening technological processes on illustration of plasma-spraying with further high-energy handling is introduced. It's shown that on all stages including character and obtaining of material, its application and final polishing the specific tasks are solved. As a result it allows to shape required structure and running ability of coating.

Keywords: hardening, recovery, combined technological process, plasma deposition, high-energetical treatment (plasma, laser), wear-resistant coating, cold-hardening, composition powders.

Актуальной задачей современного машиностроения является повышение эксплуатационных свойств быстроизнашивающихся деталей машин, работающих в сложных условиях механических нагрузок, изнашивания, воздействия агрессивных сред и высоких температур, путем модифицирования поверхностей, нанесения покрытий.

Мировая наука и практика значительно продвинулась в этом направлении. Наиболее полно существующие технологии упрочнения и восстановления изложены в работах [1], [2].

Поскольку работоспособность конкретной детали машины определяется комплексом композиции "основной материал-покрытие", т.е. как эксплуатационных свойств материала поверхности (покрытия), так и основы, зачастую резко различающихся по свойствам, эту композицию следует рассматривать как единое целое и исследовать всесторонне (рис. 1) [3].

Основным теоретическим принципом, объясняющим суть механизма упрочнения, является дислокационная теория, согласно которой идеальным по прочности является бездефектный металл, который

сложно изготовить в условиях земной гравитации. Вторым направлением упрочнения, которым реально пользуется человечество на протяжении своего развития, является увеличение плотности дислокаций сверх критической и взаимоторможение их движения путем легирования, пластической деформации, термической обработки (закалки) и тому подобных приемов.

Вместе с тем "особые надежды возлагаются на высокую рентабельность вновь разрабатываемых комплексных процессов упрочнения на основе различных комбинаций методов ППД с другими упрочняющими технологиями" [1].

Понятие комплексный (комбинированный) процесс упрочнения может иметь отличающуюся трактовку. Это может быть ППД в сочетании с химико-термическими, термомеханическими, гальваническими и другими упрочняющими технологиями [1] либо объемное упрочнение основного металла и поверхностное – нанесение специальных покрытий [3].

Очевидно одно, что сочетание отдельных видов упрочнения позволяет получать значительно боль-



Рис. 1. Алгоритм проектирования комбинированных процессов

ший эффект в повышении конструктивной прочности при взгляде с точки зрения классической триады: прочность – надежность – долговечность.

Так, например, лазерное упрочнение поверхности стали ШХ15, предварительно подвергнутой ППД, дает возможность увеличить поверхностную твердость до 9340 HV (без ППД – 6290 HV).

Дополнительное ППД лазерно-упрочненной стали позволяет повысить на 20 %, а в ряде случаев и на порядок износостойкость без ухудшения антифрикционных свойств лазерно-упрочненных слоев [1].

Весьма эффективно лазерное упрочнение в сочетании с ультразвуковой обработкой, особенно для деталей, работающих в условиях усталостного нагружения.

Ученым ФТИ НАН Б удалось повысить сопротивление усталости сталей и титановых сплавов и контактную выносливость комбинированным упрочнением (лазерная обработка + ППД) дополнительно до 2 раз.

Таким образом, комбинированный упрочняющий технологический процесс является многофакторным и, как правило, для обеспечения его эффективности необходимо решение оптимизационных задач.

Главными факторами и этапами комбинированного процесса являются:

1. Анализ достоинств и недостатков предполагаемых для комбинирования процессов упрочнения является основой для выбора этих комбинаций с позиции наибольшей эффективности синтезируемого комплексного процесса.

Так, например, газотермическим напыленным покрытиями не хватает плотности и хорошей сцепляемо-

сти с основой, поэтому комбинирование напыления с последующим импульсным или непрерывным высокоэнергетическим воздействием плазмой, лазером, электронным лучом позволяет в значительной степени или полностью устранить эти недостатки.

Поверхностная закалка (плазменная, лазерная, индукционная) создает растягивающие напряжения на поверхности. Последующее ППД позволяет трансформировать растягивающие напряжения в сжимающие, что обеспечивает повышение в 2 и более раз сопротивления усталости при знакопеременных нагрузках на упрочненные детали.

Если ППД является финишной операцией, то в ряде случаев она обеспечивает и требуемую степень шероховатости поверхности.

2. Степень дисперсности и неравновесности вводимых в покрытие или получаемых в нем фазовых составляющих.

Чем мельче структура (от микро- к ультрадисперсной, нанофазной и далее к аморфной), тем выше комплекс эксплуатационных характеристик. Высокоэнергетические воздействия концентрированными источниками энергии на материал вызывают по мере роста плотности энергии на единицу поверхности и минимизации времени воздействия все большую измельченность структуры.

Требуемый эффект измельченности может достигаться управляемой интенсивной пластической деформацией, *равноканальным угловым* (РКУ) прессованием, дисперсионным твердением при термической обработке. Эффективным является также прямое введение в формируемое покрытие, например электрохимическое, требуемого количества наноразмерных частиц.

Таким образом, степень дисперсности фазовых составляющих покрытия можно регулировать как прямым путем, вводя в покрытие частицы нужных размеров, так и технологическими воздействиями. Важными являются также степень гетерогенности или гомогенности структуры, плотность дислокаций поверхности.

3. Химическая природа материала покрытия или поверхностного слоя детали.

В ряде случаев природа материала и поверхности изделия является определяющей ее ресурс с позиции высоких эксплуатационных свойств для конкретных условий работы. Так, например, для работы в условиях абразивного изнашивания наиболее эффективны покрытия из высокотвердых боридов, карбидов, нитридов, оксидов и других металлоподобных фаз, твердость которых превышает твердость абразива.

Для работы в условиях высокотемпературных окислительных сред эффективны покрытия, содержащие Ni, Co, Cr, Si, Al или керамику.

Резюмируя вышеприведенное, можно предложить следующий алгоритм проектирования *комбинированного упрочняющего процесса* (КУП), обеспечивающего повышение долговечности деталей машин.

В качестве примера реализации названной методики приведен обобщенный результат исследований комбинированного технологического процесса нанесения плазменных покрытий с последующей обработкой высокоэнергетической плазменной струей для обеспечения повышенной износостойкости.

Проведенные исследования позволяют выделить показатели упрочнения плазменных износостойких покрытий $NiCr/FeCr/FeCrMo+MoS_2/CaF_2/графит+TiC$ при их обработке высококонцентрированными потоками энергии, в частности импульсами плазменной струи. К ним относятся: уплотнение нанесенного материала, изменение его напряженного состояния, аморфизация структуры покрытия.

При воздействии высококонцентрированными потоками энергии импульсов плазменной струи, наряду с упомянутыми процессами, важными факторами являются: усиление прочности межфазных связей композиционного материала, пластическая деформация и наклеп, возрастание диссипирующей способности материала покрытия. Например, усиление прочности межфазных связей покрытий $FeCr(FeCrMo)+графит+TiC$ достигается за счет формирования вторичных соединений из элементов связующего ($FeCr, FeCrMo$) и карбидов TiC или твердой смазки (графита). Как показал рентгенофазовый анализ, в таких напыленных покрытиях после их импульсно-плазменной обработки образуются новые тонкодисперсные фазы $Cr_7C_3, Fe_3C, Fe_2C, C_{19}Cr_7Mo_{24}, Fe_{63}Mo_{37}, FeTi, MoC$. Эти соединения формируются вблизи основных межфазных границ, затрудняя их разрушение и упрочняя покрытие.

При упрочнении наклепом значительная роль принадлежит увеличению плотности дислокаций пластически деформируемого материала. Увеличение плот-

ности дислокаций наблюдалось при рентгеноструктурном анализе обработанных покрытий (таблица).

Что касается возрастания диссипирующей способности напыленных материалов, то это также обеспечивается накоплением дислокационной субструктуры. Процесс формирования дислокационной субструктуры может быть представлен в виде физической модели, которая отражает последовательность и взаимосвязь преобразований энергии и структурно-фазовых превращений в напыленных материалах при обработке импульсами компрессионных плазменных потоков (рис. 2).

Как видно из рис. 2, совокупность трех одновременно протекающих структурообразований в связующей и карбидной фазах, на межфазных границах, приводит к формированию дислокационной субструктуры, насыщенной дислокационными каналами диссипации энергии. Благодаря этому существенно снижается скорость увеличения плотности внутренней энергии покрытия от трения и энтропии как критериев износостойкости материалов.

Механизм упрочнения покрытий с повышением их износостойкости обеспечивается не только импульсно-плазменной обработкой напыленного материала. Предпосылки упрочнения создаются на всех

Плотность дислокаций в покрытиях

Материал покрытия	Фаза	Плотность дислокаций в объеме кристалла, $\times 10^8 \text{ см}^{-2}$	
		до обработки	после обработки
$FeCr_{30}Mo_3+7\% \text{ графит}+70\% \text{ TiC}$	$\alpha\text{-Fe}$	1,514	2,752
	TiC	18,048	26,643
$FeCr_{30}+10\% \text{ графит}+70\% \text{ TiC}$	$\alpha\text{-Fe}$	2,402	3,511
	TiC	17,871	24,697



Рис. 2. Физическая модель формирования дислокационной структуры напыленных композиционных покрытий, обработанных импульсами плазменной струи

этапах нанесения покрытия. В частности, при *самораспространяющемся высокотемпературном синтезе* (СВС) исходных композиционных порошков для создания таких предпосылок в состав композиций вводят Ni, Cr, C, MoS₂, CaF₂, графит (для стабилизации слоев смазки трибосопряжений), карбидообразующие элементы (для увеличения твердости покрытий и их сопротивления изнашиванию микроконтактным схватыванием, а также при воздействии абразивных частиц), элементы для формирования твердого раствора на основе никеля или железа как связующего, обеспечивающего когезионную прочность композиции.

При синтезе исходных композиционных порошков необходимо учитывать, что важным показателем качества наносимых покрытий является их способность сохранять неравновесное аморфизированное состояние, полученное при обработке высококонцентрированными потоками энергии. Критерием указанной способности наиболее часто служит температура кристаллизации $T_{кр}$ материала покрытия. Чем больше $T_{кр}$, тем выше способность аморфизированных материалов покрытий сохранять неравновесные структуры.

Экспериментальные исследования показывают, что наличие двух и более металлоидов повышает термическую стабильность аморфных композиций. Например, при введении в аморфную композицию *переходных металлов* (ПМ) из IV–VI групп периодической таблицы наблюдается повышение $T_{кр}$. При этом термическую стабильность связывают с величиной заряда, передаваемого атомами легирующего переходного металла аморфной матрице. Можно предположить, что силы межатомной связи, определяющие термическую стабильность аморфных композиций, возрастают при увеличении заряда, передаваемого атомами переходного металла. По возрастанию степени положительного влияния вводимые переходные металлы составляют следующий ряд:

Cr, V, Mo, Ti, Nb, W, Ta.

Важным этапом нанесения покрытий, на котором создаются предпосылки их упрочнения с повышением износостойкости, является газотермическое (плазменное) распыление синтезированного композиционного порошка. Для создания предпосылок упрочнения на данном этапе наряду с оптимизацией режимов напыления необходимо снижать формирующиеся при этом неблагоприятные остаточные растягивающие напряжения.

С учетом выполненного обобщения результатов исследований научные основы нанесения газотермических покрытий повышенной износостойкости систематизированы на рис. 3. Система объединяет наиболее значимые процессы (закономерности), создающие

предпосылки упрочнения покрытий на различных этапах их нанесения.

Схема процессов для формирования газотермических покрытий повышенной износостойкости (см. рис. 3) реализуется в условиях нанесения покрытий с использованием оптимизированных режимов и других технологических принципов и рекомендаций. Для увеличения адгезионной прочности наносимого материала важным этапом технологии является подготовка поверхности изделия к напылению. Для очистки и активации поверхности на нее воздействуют струей абразивного материала.

При выполнении операции изделие или блок изделий размещают в рабочей камере абразивно-пневматической установки. В качестве абразива рекомендуется электрокорунд, позволяющий получать развитый микрорельеф подготавливаемой поверхности и в меньшей степени загрязняющий подложку в сравнении с карбидом кремния. С целью предотвращения образования поверхностных трещин, снижающих усталостные характеристики изделия, не рекомендуется применять чрезмерно высокое давление сжатого воздуха, транспортирующего абразив ($p \leq 0,6$ МПа).

После струйно-абразивной подготовки поверхности изделия его обдувают сжатым воздухом. При попадании масла или влаги на подготовленную поверхность ее необходимо очистить смоченной в этиловом спирте салфеткой с повторением струйно-абразивной обработки. Для удаления следов абразива с поверхности применяют ультразвуковую очистку изделия в этиловом спирте.

Наряду с упомянутой подготовкой поверхности для увеличения адгезионной прочности покрытий и снижения остаточных напряжений в системе "покрытие–подложка" целесообразно предварительное напыление подслоя. При этом подслоя должен характеризоваться повышенной прочностью сцепления с подложкой, достаточной пластичностью и коэффициентом термического расширения, соответствующим аналогичному коэффициенту основного слоя покрытия ($\alpha_{подслоя} \approx \alpha_{осн.слоя}$). Как показали исследования, при нанесении покрытий типа NiCr/FeCr/FeCrMo+MoS₂/CaF₂/графит+TiC эффективно напыление подслоя NiAl толщиной 0,05 мм.

Структурные элементы рабочей поверхности нанесенных материалов должны распределяться равномерно. В предлагаемой технологии это обеспечивается применением исходных композиционных материалов в виде порошков, напыляемых высокотемпературной струей плазмы. Каждая частица порошка представляет собой композицию структурных элементов покрытий.

Размер частиц напыляемого порошка во многом формирует свойства покрытия, стабильность фракции – пределы изменения свойств. Рассев порошка

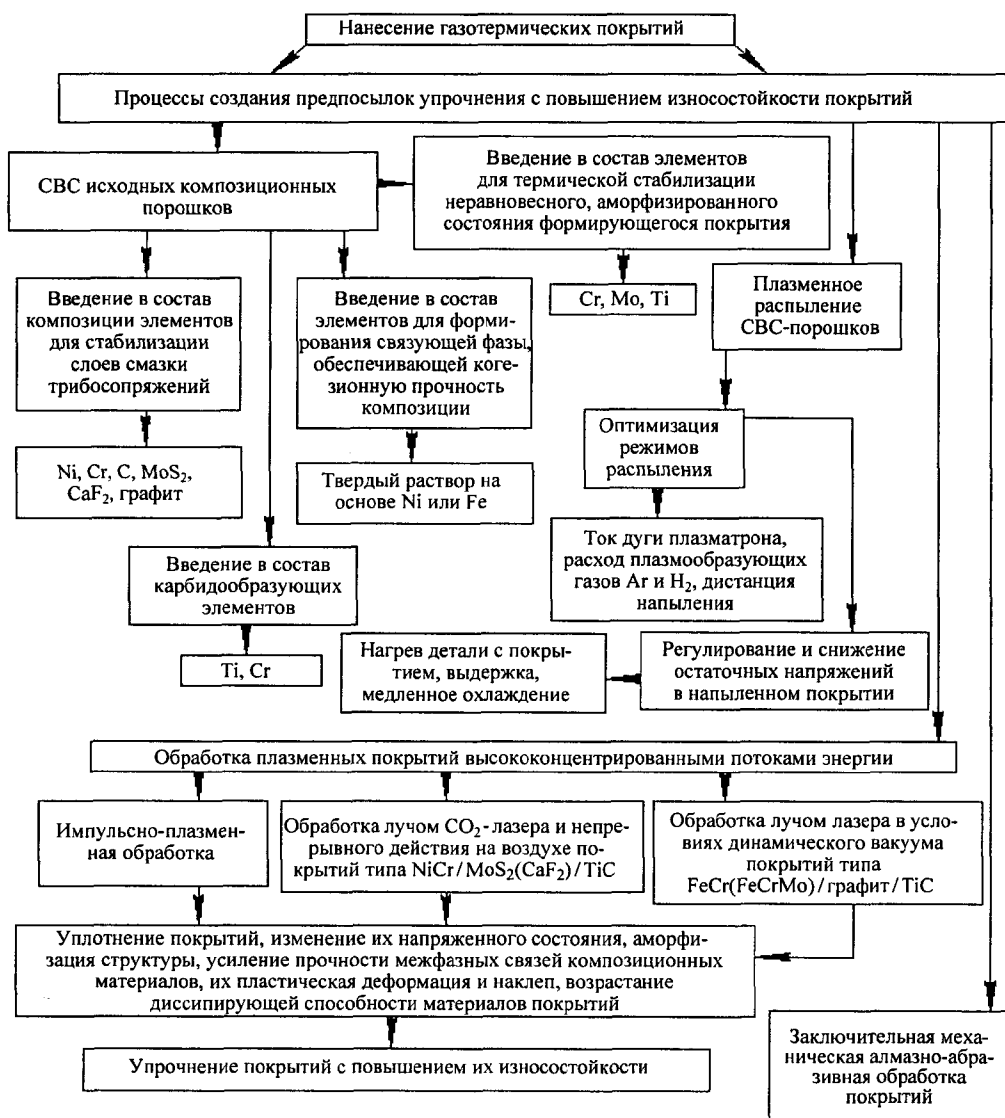


Рис. 3. Систематизированные процессы для нанесения плазменных покрытий повышенной износостойкости

на фракции осуществляют на устройствах ситового анализа или в классификаторах порошка. Предпочтительные размеры частиц порошка для плазменного напыления подслоев NiAl (NiCr) и основных слоев NiCr/FeCr/FeCrMo+MoS₂/CaF₂/графит+TiC составляют 40...100 мкм.

Известно, что защитные свойства покрытий зависят от их толщины. Увеличение этого параметра способствует улучшению защитных свойств. Однако пределы увеличения ограничены возрастающими остаточными напряжениями, вызывающими отрицательный эффект. Установлено, что толщина износостойких композиционных покрытий NiCr/FeCr/FeCrMo+MoS₂/CaF₂/графит+TiC – 0,5...0,6 мм. Рекомендации по толщине износостойких покрытий связаны с необходимостью предусматривать припуск на механическую обработку деталей трибосопряжений.

Одним из основных этапов предлагаемой технологии является послойная импульсно-плазменная обработка полученного напылением материала. Указанная операция выполняется на специальном оборудовании, которое представляет собой квазистационарный сильноточный плазменный ускоритель в вакуумной камере. Энергетический уровень импульсных воздействий на слой покрытия регулируется изменением дистанции обработки.

Технологический вариант установки должен иметь оснастку, которая обеспечивает минимальные затраты времени на регулировку режимов импульсно-плазменной обработки, снятие и установку обрабатываемых изделий. Технологические рекомендации в виде схемы основных операций по нанесению композиционных покрытий повышенной износостойкости приведены на рис. 4.

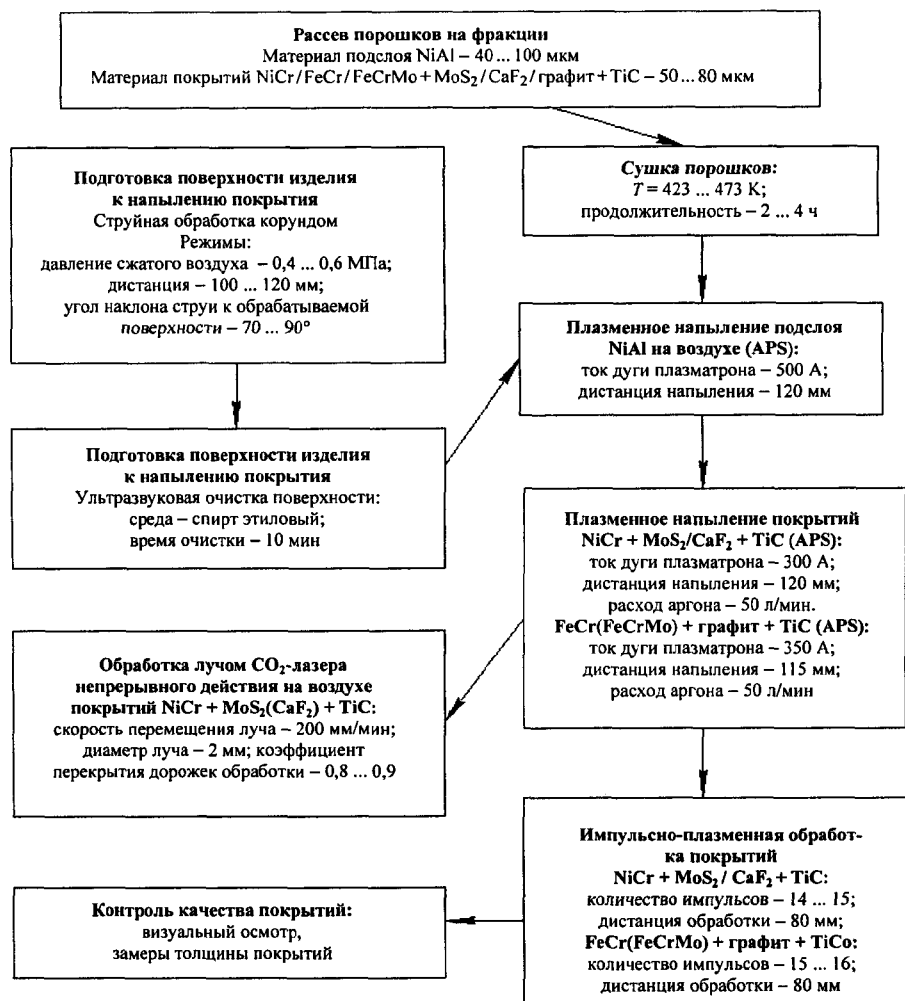


Рис. 4. Схема технологического процесса нанесения композиционных покрытий повышенной износостойкости

Проанализировано состояние вопроса и перспективы синтеза износостойких порошков с микрогетерогенной структурой частиц для формирования износостойких плазменных покрытий. Проведенный анализ свидетельствует о перспективности получения порошков путем СВС.

С применением технологии СВС синтезированы порошки типа NiCr/FeCr/FeCrMo+MoS₂/CaF₂/графит+TiC с исследованием параметров их композиционных частиц. Анализ размеров частиц, формы и рельефа их поверхности осуществляли с применением сканирующей электронной микроскопии. Согласно полученным данным порошки характеризуются сложной геометрической формой и рельефом поверхности частиц, размеры которых при свободной насыпке и диспергировании ультразвуком заметно различаются.

Это свидетельствует о склонности порошков к образованию комков, что снижает "текучесть" порошковых материалов и их технологичность при плазмен-

ном напылении покрытий. Поэтому для удаления влаги синтезированные композиционные порошки перед напылением необходимо просушивать при температурах 423...473 К с периодическим перемешиванием в течение 2...4 ч, а в процессе напыления – предварительно подогреть до 373...393 К.

Согласно результатам металлографического и рентгеноструктурного анализа основными составляющими структуры композиционных частиц являются твердые растворы на основе никеля и железа, карбиды титана, включения твердой смазки в виде дисульфида молибдена, фтористого кальция, графита.

Показано, что упомянутые элементы структуры исходных порошков создают предпосылки формирования из них газотермических покрытий, эффективно сопротивляющихся молекулярно-механическому изнашиванию и абразивному воздействию в процессе трения. С учетом обобщенных данных по результатам исследований синтезированных композиционных порошков разработаны критерии прогнозирования свойств плазменных напыленных порошковых материалов.

Исследованы и оптимизированы технологические параметры плазменного напыления композиционных порошков NiCr/FeCr/FeCrMo+MoS₂/CaF₂/графит+TiC. Методика базируется на оптимизации параметров по коэффициенту использования напыляемого порошка (КИП), который является интегральным показателем состояния соударяющихся с подложкой наносимых частиц и их способности формировать покрытия с необходимым уровнем когезионной и адгезионной прочности. Кроме того, предложен методический подход, позволяющий оптимизировать режимы термической обработки напыленных материалов для снижения остаточных напряжений, в том числе растягивающих, отрицательно влияющих на работоспособность покрытий.

Установлено, что оптимальные режимы напыления, которым соответствуют максимальные значения КИП, находятся в пределах: ток дуги плазматрона 300...350 А; напряжение дуги 75 В; расход плазмообразующего газа (аргона) 50 л/мин; дистанция напыления 115...120 мм. Оптимальные режимы термической обработки напыленных материалов для сниже-

ния остаточных напряжений находятся в следующих пределах: нагрев детали с покрытием до $T = 623$ К; выдержка $\tau = 2...3$ ч; медленное охлаждение.

Исследованы и оптимизированы технологические параметры упрочняющей термической обработки напыленных покрытий с использованием высококонцентрированных потоков энергии. Методика базируется на оптимизации параметров по результатам металлографического, рентгенофазового и рентгеноструктурного анализов образцов покрытий NiCr/FeCr/FeCrMo+MoS₂/CaF₂/графит+TiC после воздействия на них импульсами плазменной струи или лучом CO₂-лазера непрерывного действия. Критерием оптимизации служило формирование полностью оплавленных по всей толщине покрытий с элементами упрочнения, к которым относятся уплотнение и аморфизация нанесенного материала, изменение его напряженного состояния и усиление межфазных связей, пластическая деформация и наклеп, возрастание диссипирующей способности материала покрытия.

Установлены оптимальные режимы импульсно-плазменных воздействий: количество импульсов 14 и 16; дистанция обработки 0,08 м. К оптимальным режимам лазерной обработки покрытий NiCr+MoS₂/CaF₂+TiC относятся скорость перемещения луча 200 мм/мин, его диаметр 2 мм, коэффициент перекрытия дорожек обработки 0,8...0,9 (при мощности луча лазера 700 Вт). Выявлено, что покрытия FeCr(FeCrMo)+графит+TiC при обработке CO₂-лазером непрерывного действия в условиях атмосферы не склонны к формированию структур, удовлетворяющих требованиям повышенной прочности и износостойкости из-за образования избыточной хрупкой оксидной фазы.

Факторы упрочнения при обработке высококонцентрированными потоками энергии, о которых упоминалось, вызывают увеличение микротвердости покрытий на 20...30 %. При этом эффективность импульсно-плазменных воздействий выше в сравнении с лазерным лучом. Микротвердость покрытий, обработанных лазерным лучом, находилась в пределах 6790...8850 МПа и снизилась на 8...11 % в сравнении с процессом импульсно-плазменной обработки, что, очевидно, объясняется уменьшением степени формирования неравновесных (метастабильных) фаз. Это согласуется с результатами рентгенофазового анализа лазерных покрытий, которые свидетельствуют о менее заметных элементах "гало" на рентгенограммах, характерных для неравновесных аморфизированных структур.

Эффективность синтезированных композиционных порошков и предлагаемых технологий формирования покрытий из них подтверждена триботехническими испытаниями нанесенных композиций NiCr/FeCr/FeCrMo+MoS₂/CaF₂/графит+TiC. В смоделированных при лабораторных испытаниях неблагоприятных условиях трения (граничная жидкая

смазка, значительные контактные нагрузки и температуры) наиболее износостойки покрытия Ni₈₀Cr₂₀+12,5%MoS₂+55%TiC и FeCr₃₀Mo₃+7%графита+70%TiC. В целом износостойкость покрытий NiCr/FeCr/FeCrMo+MoS₂/CaF₂/графит+TiC превышает этот показатель для эталонной стали 45 с твердостью 48...52 HRC в 3 и более раз.

Повышенная износостойкость обусловлена прежде всего формированием стабильной смазочной пленки трибосопряжений (жидкая смазка + пленка из MoS₂/CaF₂/графит) и твердостью покрытий. Существенно снижается интенсивность молекулярно-механического изнашивания (за счет микроконтактного схватывания), возрастает сопротивление воздействию абразивных частиц. Замеры коэффициентов трения покрытий NiCr/FeCr/FeCrMo+MoS₂/CaF₂/графит+TiC свидетельствуют о том, что величина коэффициента находится в пределах 0,013...0,078 (в 4 и более раз ниже, чем у стали 45).

Выводы

Предложена методика разработки комбинированных упрочняющих технологий, проведено теоретическое обобщение результатов исследований с разработкой научных основ, технологических принципов и рекомендаций по нанесению газотермических покрытий повышенной износостойкости. Научные основы представляют собой систематизированные процессы, создающие предпосылки упрочнения покрытий на всех этапах их нанесения (синтез композиционных порошков, плазменное напыление порошков, упрочняющая обработка покрытий высококонцентрированными потоками энергии, заключительная механическая алмазно-абразивная обработка покрытий).

Проведенные исследования, рассмотренные механизмы упрочнения и разрушения поверхностей трения дают основание полагать, что полученные покрытия NiCr/FeCr/FeCrMo+MoS₂/CaF₂/графит+TiC характеризуются работоспособностью при неблагоприятных условиях трения (граничная смазка, значительные контактные нагрузки и температуры). При этом они могут найти применение при восстановлении и упрочнении деталей моторостроения и металлургического оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поляк М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения в 2-х т. М.: "Л.В.М. – СКРИПТ", "Машиностроение", 1995.
2. Пантелеенко Ф.И., Лялякин В.П. и др. Восстановление деталей машин: справочник / Под ред. В.П. Иванова. М.: Машиностроение, 2003. 672 с.
3. Методы исследования материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, А.О. Токарев, В.И. Синдеев. М.: Мир, 2004. 384 с.