

Тополянский П.А., Соснин Н.А. Методология разработки технологических процессов газотермического напыления защитных и износостойких покрытий. Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций. Материалы 5-й Международной практической конференции-выставки 8-10 апреля 2003 г. Санкт-Петербург. Изд. СПбГПУ, 2003. - С. 28-45

МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ И ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

ТОПОЛЯНСКИЙ П.А., СОСНИН Н.А.

НПФ «Плазмацентр», СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия

Методы восстановления и нанесения покрытий с использованием процессов газотермического напыления (ГТН) порошковых материалов находят широкое применение в промышленности. Разработка технологии ГТН, а именно выбор материалов, оборудования, конкретного метода ГТН, режимов нанесения покрытий основывается на следующей методологии.

1. Определение требований к восстановлению и нанесению защитных покрытий на основании анкетирования поставленной задачи

Ниже приведена анкета, ответы на вопросы которой позволяют наиболее рационально выбрать альтернативные материалы, оборудование и процесс нанесения покрытий применительно к конкретной производственной задаче.

1. Наименование детали машин, механизмов, оборудования, металлоконструкции, инструмента или оснастки, а также название изделия, куда входит данная деталь (приложите чертеж или эскиз с указанием мест износа, поверхностей для восстановления, упрочнения или нанесения покрытия).
2. Существующая технология изготовления данной детали.
3. Основная задача ремонта, восстановления, нанесения покрытия, упрочнения и обновления применительно к данной детали (например, обеспечить восстановление геометрических размеров, физико-механических свойств поверхности, повысить долговечность, надежность и др.)
4. Условия работы детали (укажите температуру, среду, нагрузки, наличие смазки, контактирующие детали и др.).
5. Характеристика износа при существующей технологии изготовления детали (например, задиры, кавитация, эрозия, коррозия, изменение геометрических размеров, укажите равномерность износа, время до появления трещин, опишите дефектные зоны и др.).

6. Технические требования к защитному покрытию или упрочняющей обработке (укажите толщину покрытия, параметры шероховатости, допустимость зон несплошностей и пор, прочность сцепления покрытий и т.д.).
7. Для деталей, работающих в паре трения укажите ответную деталь, ее материал, твердость, размеры.
8. Для деталей испытывающих коррозионные разрушения укажите воздействующие факторы окружающей среды, продолжительность эксплуатации изделия, существующую технологию защиты от коррозии.
9. Средняя стойкость деталей, инструмента, оснастки изготавливаемых по существующей технологии (укажите длительность работоспособности до замены, переточки, ремонта).
10. Ориентировочное количество деталей изготавливаемых или приобретаемых (в течение года) взамен изношенных (укажите ориентировочную стоимость новой детали).
11. Достаточная экономическая эффективность при использовании новой технологии, материалов, оборудования (например, повышение работоспособности детали в 2 раза, использование экологически чистых процессов и т.д.).
12. Укажите рекомендуемый способ испытания детали, ее модели, образцов-свидетелей после использования новой технологии, материалов, оборудования

II. Определение механизмов износа детали по существующим классификациям в зависимости от условий эксплуатации.

Ниже приведены характерные условия работы отдельных деталей, для которых эффективно использование различных покрытий. На основании вида изнашивания выбираются группы материалов для нанесения покрытия.

Схематическое изображение	Условия изнашивания	Вид изнашивания или характер воздействия	Наименование деталей
---------------------------	---------------------	--	----------------------

	<p>Взаимодействие с особо твердыми абразивными частицами (например, корундом, карбидом кремния, кварцевым песком, дробленой породой и т.п.)</p>	<p>Абразивное изнашивание при низком давлении (микрорезание металла острыми абразивными частицами)</p>	<p>Детали дробильного и размольного оборудования, классификаторов, прессформ для изготовления кирпича, абразивного инструмента</p>
	<p>Газоабразивный поток (воздух с песком, гранулированный шлак, стальная дробь, зола)</p>	<p>Эрозионный износ, интенсивность разрушения зависит от угла атаки абразивных частиц, температуры и химической активности газа (скорость потока газа 30-300 м/с)</p>	<p>Детали котлов высокого давления и газовых турбин, вентиляторов, дробеструйных и пескоструйных аппаратов</p>
	<p>Формовочная земля, песок</p>	<p>Абразивное изнашивание</p>	<p>Детали пескоструйных аппаратов, дробеструйных машин, формовочных машин</p>

	<p>Кварцевый песок, дробленая порода (сухая или влажная)</p>	<p>Абразивное изнашивание</p>	<p>Клыки роторных экскаваторов, режущие зубья, детали брикетных прессов, ковши</p>
	<p>Трение металла с химическими материалами (пластическими массами, сырым синтетическим каучуком, удобрениями)</p>	<p>Абразивное изнашивание при взаимодействии с агрессивными химическими материалами (температура до 400°С)</p>	<p>Детали экструдеров, отжимных машин, погрузчиков и конвейеров, машин для внесения удобрений</p>
	<p>Взаимодействие металла при движении в песчано-глинистой массе (песок, чернозем, суглинки и др.)</p>	<p>Абразивный износ (при скорости до 4 м/с, давлении 0,1 - 1,8 МПа, температуре металла до 150° С)</p>	<p>Рабочие органы почвообрабатывающих машин (лемехи плугов, лапы культиваторов, диски борон и др.)</p>
	<p>Взаимодействие с плотной песчано-глинистой массой и включениями щебня, камней</p>	<p>Абразивный износ (при скорости движения до 1,6 м/с и динамическими нагрузками)</p>	<p>Подбойки путеремонтных машин, ковши экскаваторов, детали строительно-дорожных и сельскохозяйственных машин</p>
	<p>Резание монолитной горной породы, замерзшего грунта и песка</p>	<p>Интенсивный абразивный износ при давлении до 500 кгс/см² и интенсивном нагреве металла</p>	<p>Буровое оборудование, горный и камнеобрабатывающий инструмент, детали дробилок</p>

	<p>Направленное движение абразивных частиц (песок, стальная и чугунная дробь, электрокорунд, карбид кремния)</p>	<p>Ударно-абразивное изнашивание при угле атаки около 90° и скорости движения абразивных частиц 30 м/с</p>	<p>Лопатки пескометов и дробеметов, отбойные листы, лопасти дымососов и вентиляторов</p>
	<p>Уголь, известняк и другие горные породы</p>	<p>Ударно-абразивное изнашивание</p>	<p>Била молотковых дробилок и мельниц для размола угля</p>
	<p>Известняк, каолин и другие горные породы</p>	<p>Абразивное изнашивание</p>	<p>Валки дробилок с шипами</p>
	<p>Руда и горные породы средней и высокой твердости</p>	<p>Ударно-абразивное изнашивание при давлении до 500 кгс/см^2 с возможностью выкрашивания, изломов и деформации</p>	<p>Детали отбойных молотков, дробильного оборудования (щеки дробилок, бандажи валковых дробилок), зубья ковшей экскаваторов</p>
	<p>Уголь, известняк и другие горные породы</p>	<p>Ударно-абразивное изнашивание</p>	<p>Детали молотковых дробилок, шаровых мельниц</p>

	<p>Гидроабразивный поток, жидкая среда и твердые взвешенные зерна (песок и др.)</p>	<p>Гидроабразивное изнашивание (скорость потока до 40 м/с, интенсивность разрушения зависят от направления скорости движения и количества абразивных частиц в жидкости)</p>	<p>Детали шламовых и песковых насосов, гидротурбин, трубопроводы земснарядов, распыливающие наконечники опрыскивателей</p>
	<p>Песок и гравий, молотые минералы</p>	<p>Гидроабразивное изнашивание</p>	<p>Мешалки и другие детали смесителей, земснарядов</p>
	<p>Песок, гравий и камни</p>	<p>Гидроабразивное изнашивание</p>	<p>Детали морских землечерпалок, грейдеров и экскаваторов</p>
	<p>Трение в запыленном воздухе</p>	<p>Абразивный износ при трении металла по металлу без смазки или с граничной смазкой</p>	<p>Детали открытых передач, гусеничных машин, цепей экскаваторов, звездочки ковшевых элеваторов, измерительный инструмент</p>

	<p>Трение в условиях запыленного смазочного материала</p>	<p>Абразивное изнашивание при содержании в масле 0,02 % пылевидных частиц кварца</p>	<p>Механические передачи, детали гидроагрегатов, поршневых двигателей, топливной аппаратуры, фильтры, направляющие станков</p>
	<p>Формообразование</p>	<p>Трение металла по металлу при давлении более 500 кгс/см², ударах и скольжении</p>	<p>Гибочные и вытяжные штампы холодной штамповки</p>
	<p>Трение качения при попадании абразивных частиц</p>	<p>Усталостное и абразивное изнашивание (при проскальзывании интенсивность изнашивания увеличивается)</p>	<p>Звездочки, шестерни и звенья цепей открытых передач, опорные катки гусеничного хода тракторов, колеса кранов, бандажи трамвайных колес, колесные пары ж/д колес</p>
	<p>Движущийся резиновый или другой материал</p>	<p>Абразивный износ при трении металла по резине с возможным попаданием абразива</p>	<p>Ролики транспортных лент, ременная передача</p>

	<p>Трение качения с ударами</p>	<p>Трение качения с ударами, вызывающими смятие, а также абразивное изнашивание</p>	<p>Железнодорожные крестовины рельс, звенья гусениц</p>
	<p>Трение металла по металлу</p>	<p>Усталостное изнашивание при граничной смазке</p>	<p>Зубья шестерен, крестовина карданного вала</p>
	<p>Трение скольжения с попаданием абразивных частиц</p>	<p>Усталостное изнашивание при граничной смазке и наличии пылевидных частиц и продуктов износа (малые скорости движения и давление до 50 МПа)</p>	<p>Пальцы и траки гусениц тракторов, открытые подшипники скольжения, шарнирные соединения, уплотнения валов, узлы трения скольжения</p>
	<p>Трение скольжения при использовании антифрикционных материалов</p>	<p>Усталостное изнашивание при наличии смазки</p>	<p>Валы и оси в узлах трения</p>
	<p>Трение скольжения в жидких средах</p>	<p>Эрозионный износ при возможности попадания абразивных частиц</p>	<p>Концевые валы судов, подшипники скольжения гидравлических приводов</p>
	<p>Ударное воздействие жидких сред</p>	<p>Кавитационный износ при гидравлических ударах и разрушении пузырьков</p>	<p>Лопасты гидротурбин, судовых винтов, лопатки паровых турбин</p>

	<p>Скольжение металла по антифрикционному покрытию в жидких средах</p>	<p>Усталостное разрушение при возможности попадания абразивных частиц и продуктов износа</p>	<p>Плунжеры гидравлических прессов, насосов, поршни двигателей</p>
	<p>Циклические и динамические нагрузки при трении металла по металлу</p>	<p>Усталостные разрушения, фреттинг-коррозия</p>	<p>Посадочные места под подшипники качения валов</p>
	<p>Вырезка, формообразование при трении металла по металлу</p>	<p>Усталостное изнашивание при давлении более 500 кгс/см² и ударных нагрузках</p>	<p>Ножи ножниц холодной резки, обрезающие штампы холодной штамповки</p>
	<p>Вырезка, формообразование деталей, нагретых до температуры 1200°C</p>	<p>Усталостное изнашивание при давлении более 500 кгс/см², ударных нагрузках, скольжении металла по металлу при наличии окислительной атмосферы и резком охлаждении</p>	<p>Ножи ножниц горячей резки, штампы горячей штамповки</p>

	<p>Формообразование нагретого металла</p>	<p>Усталостные и окислительные разрушения при ударных нагрузках</p>	<p>Ковочные молоты, ковочные штампы и прессформы горячей штамповки и прессования</p>
	<p>Прокатка горячего металла</p>	<p>Усталостное и окислительное разрушение при циклическом нагреве и охлаждении</p>	<p>Валки горячей прокатки</p>
	<p>Воздействие образующихся горячих газов</p>	<p>Коррозионные разрушения при окислительной атмосфере и высокой температуре</p>	<p>Детали ДВС, облицовки печей</p>
	<p>Воздействие жидких и газообразных агрессивных сред</p>	<p>Коррозионный износ</p>	<p>Днища и трубы котлов, стенки резервуаров</p>
	<p>Перекрытие подачи золы, пара и др. материалов</p>	<p>Усталостный и окислительный износ при температуре до 500°C</p>	<p>Вентили, клапана паровых установок и золоуловителей, седла продувочных клапанов</p>

	<p>Бурение сухой и влажной горной породы</p>	<p>Абразивное изнашивание с ударными нагрузками</p>	<p>Зубья шарошек буровых долот, замки и муфты бурильных труб, горный и почвообрабатывающий инструмент</p>
	<p>Трение металла по металлу в агрессивных жидкостях, газах, содержащих абразивные частицы</p>	<p>Усталостные разрушения при температурах до 585°C, давлении до 1200 кгс/см² (интенсивность изнашивания зависит от состава и концентрации растворов и количества абразивных частиц)</p>	<p>Трубопроводные задвижки, вентили, клапана, рабочие органы машин для приготовления и внесения жидких удобрений, плунжера прессов</p>
	<p>Трение металла по металлу при наличии выхлопных газов</p>	<p>Усталостные и окислительные разрушения при температуре до 850°C с ударными нагрузками</p>	<p>Выхлопные клапаны двигателей внутреннего сгорания</p>
	<p>Формообразование стеклянных изделий</p>	<p>Абразивный и окислительный износ при контакте с расплавленным стеклом при температуре 600...800°C</p>	<p>Прессформы для изготовления стеклянных изделий</p>

III. Выбор материалов для нанесения покрытия на основе разработанных экспертных баз данных из отечественного и зарубежного опыта.

На основании составленных развиваемых баз данных предприятий и фирм России, стран СНГ и зарубежья, изготавливающих различные порошковые материалы для ГТН, производится выбор необходимых материалов.

IV. Выбор оборудования на основе разработанных баз данных по критериям требуемого достаточного качества нанесенного покрытия и цены оборудования.

На основании информации о производителях и продавцах оборудования для ГТН производится выбор альтернативных моделей установок.

V. Тестирование материала для напыления и его предварительной подготовки (на основании технологической инструкции «Входной контроль порошкового материала, используемого в процессах газотермического напыления»).

Входной контроль проводится с целью определения физических и технологических свойств порошкового материала. Знание этих свойств позволяет наиболее рационально выбрать технологическое оборудование для нанесения покрытия (порошковый питатель, узел ввода порошкового материала в плазматрон), обеспечить отработку технологического процесса и определить требования к хранению порошковых материалов.

К основным методам определения свойств порошкового материала относятся:

1. Определение гранулометрического состава порошкового материала. Гранулометрическим составом порошка называется относительное содержание в порошковом материале фракций зерен различной крупности. Гранулометрический состав для порошковых материалов определяется ситовым методом по ГОСТ 18318 и микроскопическим методом по ГОСТ 23402. Ситовый метод заключается в просеивании пробы порошка через набор сит, взвешивании отдельных фракций и расчете их процентного содержания (метод не распространяется на порошки с максимальным размером частиц менее 0,05 мм).
2. Определение формы зерен порошкового материала и фактора удлиненности частиц. Данный анализ устанавливает морфологический тип частиц по принципу сходства их с формами макротел не порошковой природы. Для определения фактора удлиненности частиц мысленно заключается изображение зерна порошка в прямоугольник минимальной площади. Относительные параметры прямоугольника связываются в уравнении $x=a/b$, где a, b - размеры сторон прямоугольника; x - фактор удлиненности частиц. Кроме того, по этой методике определяются особенности порошковых материалов по наличию примесей и конгломератов.
3. Определение текучести порошка. Под текучестью порошка понимается его способность сыпаться под действием силы тяжести и сцепления частиц между собой. Текучесть порошка определяется в соответствии с

ГОСТ 20899 для порошков, высыпаящихся из воронки непрерывной струей.

4. Определение угла естественного откоса порошкового материала. Угол естественного откоса α является характеристикой сыпучести и определяется как угол наклона свободно насыпанного порошкового материала к горизонтальной плоскости.
5. Определение влажности порошка. Влажность порошкового материала определяется отношением массы влаги к общей массе пробы исследуемого материала.
6. Определение твердости или микротвердости напыленных порошковых материалов. Измерение твердости покрытия по Роквеллу производится на установке типа 2140 ТР в соответствии с ГОСТ 9013. Измерение микротвердости покрытия производится на микротвердомере типа ПМТ-3 в соответствии с ГОСТ 9450.

VI. Разработка оптимального режима нанесения покрытия (с использованием выбранного порошкового материала и оборудования) с учетом проплаваемости и количественного распределения частиц порошка по пятну напыления (на основании технологической инструкции «Выбор оптимального режима процесса газотермического напыления»)

Разработка оптимального режима нанесения покрытия (с использованием выбранного порошкового материала и оборудования) основана на определении оптимальной тепловой мощности плазменной струи в зависимости от проплаваемости и оптимального количественного распределения оплавленных частиц порошка по пятну напыления.

Для реализации данной задачи разработано специальное приспособление, представляющее собой цилиндрические емкости (диаметром от 8 до 150 мм), вставленные друг в друга и образующие кольцевые зоны разных диаметров. Во время испытаний они заполняются дистиллированной водой.

Плазмотрон закрепляется вертикально на кронштейне над центром данного приспособления и проводится процесс распыления порошкового материала на предварительно выбранных трех режимах. При этом происходит осаждение расплавленных частиц в дистиллированную воду с разделением потока частиц концентрическими сечениями приспособления.

Длительность процесса напыления для всех трех режимов одинакова и составляет 1 мин. После выпаривания воды из цилиндрических емкостей проводится взвешивание частиц порошка собранных из разных зон приспособления и металлографический анализ формы зерен. Строятся графики процентного распределения количества частиц по пятну напыления.

Наилучшим считается режим, где плотность распределения частиц максимальна по отношению к оси струи. Расплавленными считаются частицы порошка, имеющие после распыления в воду сферическую форму по отношению к исходной форме частиц. Для получения максимальной прочности сцепления с основой, желательнее расплавить все частицы распыляемого порошка.

VII. Определение качества нанесенного покрытия на основании технологической инструкции «Методы исследования качества покрытий, наносимых методами газотермического напыления»

В соответствии с технологической инструкцией «Методы исследования качества покрытий, наносимых методами газотермического напыления» последовательно проводятся испытания и определение следующих характеристик качества покрытия:

- прочности сцепления при условиях адгезионного отрыва;
- прочности сцепления при условиях адгезионного сдвига;
- прочности сцепления по диаметру пятна напыления при условиях адгезионного отрыва;
- когезионной прочности сцепления;
- коэффициента использования материала;
- пористости;
- микротвердости (твердости).

Для определения каждой из этих характеристик разработаны и изготавливаются индивидуальные образцы.

Полученные характеристики свойств покрытий должны удовлетворять конструкторской документации или быть согласованы с Заказчиком изделий с покрытием.

Наиболее широкое применение из методов испытаний на прочность сцепления газотермических покрытий получил штифтовой метод. Данный метод позволяет оценивать покрытия из различных материалов обладающих высокой прочностью сцепления, а также проводить испытания при высоких температурах. Недостатком метода является то, что обработка результатов дает, хотя количественный, но в значительной степени условный результат, из-за неравномерности распределения напряжений в зоне отрыва.

Существует несколько методик испытания прочности сцепления штифтовым методом. Это связано с уменьшением влияния на получаемые результаты частиц покрытия попадающих в зазор между штифтом и матрицей, а также затирания штифта в матрице. В разработанном методе для определения адгезионной прочности используется штифтовая методика, где исключается попадание частиц в зазор между штифтом и матрицей за счет экранирующей шайбы с диаметром отверстия меньшим

диаметра штифта. Применение данной методики позволяет увеличить точность определения прочности сцепления покрытия с подложкой.

Пористость покрытия определяется на напыленных и отделенных от подложки образцах методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 18898 и металлографическим методом, на установке «Омнимет» фирмы Бюхлер (США).

Микротвердость напыленного покрытия определяется на специальном образце на микротвердомере «Микромет» фирмы Бюхлер (США) с дата-процессором или микротвердомере ПМТ-3. На образце с покрытием производятся 10 отпечатков. Средняя микротвердость покрытия определяется, как среднеарифметическое значение по всем десяти значениям микротвердости.

VIII. Тестирование натуральных или модельных образцов с покрытием при моделировании условий эксплуатации (по требованиям Заказчика)

IX. Изготовление натуральных образцов с покрытием для испытания в естественных условиях или на стендах Заказчика

X. Разработка технологической инструкции на основании положительных испытаний деталей с покрытием