

УДК621.793

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОАЛМАЗАМИ**Вариков Г.А., Дрозд К.М., Жорник В.И.**

С использованием метода многомерного проектного синтеза разработана экспериментально-статистическая математическая модель процесса газотермического напыления композиционного полимер-наноалмазного покрытия для различных видов нано-размерного модификатора (очищенные наноалмазы детонационного синтеза (НАДС) и алмазосодержащая шихта (ША)), в которой в качестве управляющих параметров приняты концентрация модификатора в исходной полимер-наноалмазной порошковой композиции (C), давление горючей смеси (P), дистанция напыления (l) и толщина покрытия (h), а критериями оптимизации являются адгезионная прочность ($\sigma_{\text{сц}}$) и коррозионная стойкость (K). На основе полученных уравнений регрессии рассчитаны оптимальные параметры процессов газотермического нанесения композиционных полимер-наноалмазных покрытий на полиамидной матрице с различными видами наноалмазного модификатора, удовлетворяющих заданным показателям качества ($\sigma_{\text{сц}} = 10,0\text{--}15,0$ МПа, $K = 35\text{--}40$ сут), в следующих границах: для покрытия «полимер-НАДС»: $C = 0,15\text{--}0,21$ масс.%, $P = 0,15\text{--}0,25$ МПа, $l = 83\text{--}113$ мм, $h = 97\text{--}111$ мкм; для покрытия «полимер-ША-А»: $C = 0,18\text{--}0,26$ масс.%, $P = 0,20\text{--}0,30$ МПа, $l = 71\text{--}101$ мм, $h = 110\text{--}134$ мкм.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, многомерный проектный синтез, полимер-наноалмазное покрытие, оптимизация, режимы напыления, параметры качества.

(Поступила в редакцию 1 августа 2018 г.)

Введение. На расход ресурса металлических емкостей для хранения и доставки к месту пожара огнетушащих веществ наряду с другими факторами (конструктивное оформление, условия эксплуатации при действии циклической нагрузки, величина пробега и др.) существенное влияние оказывают коррозионные процессы, протекающие как под воздействием атмосферных факторов, так и при их инициировании самими огнетушащими веществами.

Существует множество способов защиты элементов конструкций и деталей машин от коррозии, включая применение коррозионно-стойких материалов, введение в потенциально корродирующую среду ингибиторов, нанесение защитных покрытий и др. Однако в каждом случае приходится решать задачу, каким из методов или в каком их сочетании можно получить наибольший экономический эффект. Современная защита металлов от коррозии базируется на целом ряде методов, включающих повышение химического сопротивления конструкционных материалов, изоляцию поверхности металла от агрессивной среды, понижение агрессивности производственной среды, снижение коррозии наложением внешнего тока (электрохимическая защита) и др. Наиболее распространенными на практике являются методы нанесения различных (металлических, полимерных, лакокрасочных и др.) коррозионно-стойких покрытий.

Применение технологий формирования покрытий из термопластичных полимеров для защиты от коррозии и изнашивания является одним из эффективных путей повышения долговечности деталей машин и элементов конструкций. Покрытия, формируемые дисперсными полимерами, успешно заменяют лакокрасочные, гальванические и получаемые гуммированием. В настоящее время существуют и широко используются разнообразные методы нанесения полимерных покрытий, позволяющие формировать покрытия различного значения на поверхностях изделий из материалов практически любой природы и конструкциях любой геометрии и размеров [1–4]. Общим для всех методов является нагрев полимера на определенной стадии процесса нанесения покрытия до температуры плавления и выше. Как правило, это происходит в результате термообработки. Исключением являются некоторые методы нанесения покрытий из растворов, у которых формирование полимерного слоя (реакция полимеризации) происходит без подвода тепла [5, 6]. Выбор методов нанесения полимерных покрытий определяется геометрическими параметрами покрываемых деталей и изделий, их конструктивными и технологическими особенностями,

условиями будущей эксплуатации, а также необходимой толщиной функционального полимерного слоя.

Наиболее экономичным и простым в реализации методом нанесения полимерных покрытий при ремонте ранее обработанных деталей или при защите элементов конструкций без разборки агрегатов на месте их эксплуатации является газопламенное напыление (ГПН), позволяющее формировать и оплавливать слой в одной технологической операции. Оборудование для газопламенного напыления имеет малый вес и габариты, не требует источников электропитания, может эксплуатироваться в нестационарных условиях [7].

Эффективным методом повышения физико-механических и антикоррозионных свойств наносимых покрытий из металлов, сплавов, пластмасс является их модифицирование наноразмерными компонентами. Наноразмерные частицы различной природы (металлические, оксидные, углеродные) способны оказывать существенное влияние на процесс формирования структуры гальванических, газотермических, электростатических и других покрытий. Например, применение в качестве модификатора наноалмазов детонационного синтеза (НАДС) или шихты алмазосодержащей (ША) обеспечивает формирование мелкодисперсной структуры материалов и покрытий на основе металлов, сплавов, пластмасс различного функционального назначения с существенным улучшением их эксплуатационных характеристик. Наноструктурированные покрытия различной природы и способов нанесения характеризуются высокой адгезионной и когезионной прочностью, высокой плотностью, повышенной сопротивляемостью межкристаллитной коррозии [8, 9].

Однако процесс газотермического нанесения наноконпозиционных полимерных покрытий является многопараметрическим, характер протекания структурообразования покрытия зависит от большого количества технологических факторов, а качество формируемого материала определяется значительным количеством показателей.

В связи со сказанным, цель настоящей работы заключалась в установлении количественных зависимостей между технологическими параметрами и показателями качества покрытий для возможности осуществления оптимизации процесса получения газотермического наноконпозиционного полимерного покрытия.

Материалы и методы исследования. Для построения экспериментально-статистической математической модели использовались результаты экспериментов, полученные при газопламенном нанесении покрытий из полиамида ПА-6 (ТУ 6-13-3-88) производства ОАО «Азот» (г. Гродно) грануляцией 100–160 мкм. В качестве наноразмерного модификатора использовались очищенные наноалмазы детонационного синтеза (НАДС) и алмазосодержащая шихта ША-А (ТУ РБ 100056180-2003), выпускаемые НП ЗАО «Синта» (г. Минск), имеющие размер частиц 4–30 нм и удельную поверхность $S = 200\text{--}450 \text{ м}^2/\text{г}$.

Газопламенное напыление композиционных полимер-наноалмазных покрытий выполнялось с использованием пропано-воздушного термораспылителя марки «ТЕРКО-П», разработанного Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси (ОИМ НАН Беларуси). Режимы нанесения, состав исходной порошковой смеси и геометрические параметры покрытия варьировались в пределах: дистанция напыления – 30–200 мм; давление горючей смеси – 0,05–0,30 МПа; концентрация наноразмерного модификатора – 0,10–0,50 масс.%; толщина напыленного покрытия – 50–300 мкм.

Для измерения толщины полимерных покрытий использовался цифровой магнитный толщиномер МТЦ-2М, разработанный Институтом прикладной физики НАН Беларуси. Прочность сцепления покрытия с основным металлом (адгезионная прочность) определялась штифтовым методом [10]. Для оценки коррозионной стойкости полимерных покрытий использовалась методика МИ-1.2001 ускоренных испытаний полимерных покрытий для гальванических ванн на коррозионную стойкость, разработанная в ОИМ НАН Беларуси на основе ГОСТ 9.072-72. Методика заключается в экспериментальном определении зависимости ресурса покрытий от свойств агрессивной среды. Критерием отказа (предельного состояния) является снижение измеряемого электрического сопротивления покрытия до величины сопротивления разрушения $R_{\text{пр.крит}}$.

При разработке математической модели процесса газотермического напыления наноконпозиционного полимерного покрытия с целью определения оптимальных технологических режимов использовался метод многомерного проектного синтеза, учитывающий особенности реальной нанотехнологической системы [11].

Полученные результаты и их обсуждение. Задача, решаемая при получении газотермического наноконпозиционного полимерного покрытия, состоит в выборе таких пара-

метров технологического режима и состава напыляемой полимер-наноалмазной композиции, которые в условиях производства обеспечивают стабильное получение покрытий с заданными свойствами. Качество покрытия зависит от состава полимер-наноалмазной композиции режимов напыления, а каждый из этих параметров, в свою очередь, зависит от ряда факторов, обладающих стохастичностью.

При разработке модельного описания процесса газотермического напыления нанокомпозиционного полимерного покрытия в качестве управляющих параметров (независимых переменных) приняты:

P_1 – концентрация наноразмерного модификатора, масс.%;

P_2 – давление горючей смеси, МПа;

P_3 – дистанция напыления, мм;

P_4 – толщина покрытия, мкм.

Исходя из функциональных требований к изделиям с композиционным полимер-наноалмазным покрытием в качестве критериев оптимизации (показателей качества) выбраны следующие характеристики покрытия:

K_1 – адгезионная прочность (прочность сцепления с основой), МПа;

K_2 – коррозионная стойкость, сут.

Для определения оптимальных технологических режимов с использованием метода математического моделирования процесса нанесения нанокомпозиционного покрытия было сформировано пространство технологических параметров нанесения покрытия, включающих концентрацию наноалмазного компонента полимер-алмазной порошковой композиции, давление горючей смеси в камере сгорания, дистанцию напыления и толщину наносимого покрытия. Допустимые границы изменения параметров были определены исходя из принципов возможности технической реализации процесса и его экономической оправданности (табл. 1).

Таблица 1. – Допустимые границы параметров для разработки модели

Параметр процесса	Концентрация модификатора, масс. %	Давление горючей смеси, МПа	Дистанция напыления, мм	Толщина покрытия, мкм
Диапазон изменения параметров процесса	0,10 – 0,50	0,05 – 0,30	30 – 200	50 – 300

Уровень требований к критериям качества, определенный из условий применения композиционных полимер-наноалмазных покрытий, представлен в таблице 2.

Таблица 2. – Требования к критериям качества композиционного полимер-наноалмазного покрытия для разработки модели

Показатель качества	Значение показателя
Адгезионная прочность ($\sigma_{сш}$), МПа	10,0 – 15,0
Коррозионная стойкость (K), сут	35,0 – 40,0

Разработка математической модели для компьютерного моделирования процесса газотермического напыления композиционного полимер-наноалмазного покрытия с полиамидной матричной фазой осуществлялась для двух вариантов реализации технологии, отличающихся типом применяемого наноразмерного модификатора: а) очищенные наноалмазы (НАДС); б) ультрадисперсная алмазосодержащая шихта (ША-А). Всего из пространства параметров было исследовано по 16 точек для каждого из видов модификатора. Получены образцы покрытий для исследования их свойств по уровню прочности сцепления с основой (адгезионная прочность) и коррозионной стойкости.

При математическом моделировании методами регрессионного анализа определялись значения коэффициентов регрессии для каждого уравнения: теоретические значения функций регрессии; среднеквадратические отклонения и ошибки.

Для каждого варианта в соответствии с технологическими режимами, заданными координатами параметров в многомерном пространстве, были получены образцы покрытий и определены физические значения критериев работоспособности (прочность сцепления и коррозионная стойкость) композиционного полимер-наноалмазного покрытия. Измерения критериев работоспособности проведены в соответствии с выбранными методиками оценки адгезионной прочности и коррозионной стойкости.

Усредненные значения результатов экспериментального исследования процесса газотермического напыления композиционных полимер-наноалмазных покрытий приведены в таблицах 3, 4.

Таблица 3. – Экспериментальные данные для математического моделирования процесса нанесения композиционного полимер-наноалмазного покрытия с модификатором НАДС

№	Параметры				Показатели	
	Концентрация модификатора, масс. %	Давление горючей смеси, МПа	Дистанция напыления, мм	Толщина покрытия, мкм	Адгезионная прочность, МПа	Коррозионная стойкость, сут
1	0,1	0,05	30	50	10,3	24,6
2	0,1	0,05	200	300	3,8	35,6
3	0,1	0,3	100	200	7,8	37,8
4	0,1	0,3	150	100	11,6	33,4
5	0,25	0,1	100	200	11,5	34,5
6	0,25	0,1	150	300	7,9	46,6
7	0,25	0,2	30	50	14,3	26,7
8	0,25	0,2	200	100	17,9	37,4
9	0,4	0,1	200	300	6,8	43,9
10	0,4	0,1	30	100	13,7	36,2
11	0,4	0,2	100	50	15,8	24,3
12	0,4	0,2	150	200	10,6	32,9
13	0,5	0,05	150	50	12,6	23,9
14	0,5	0,05	30	200	8,4	31,9
15	0,5	0,3	200	300	4,9	41,6
16	0,5	0,3	100	100	9,8	34,8

Таблица 4. – Экспериментальные данные для математического моделирования процесса нанесения композиционного полимер-наноалмазного покрытия с модификатором ША-А

№	Параметры				Показатели	
	Концентрация модификатора, масс. %	Давление горючей смеси, МПа	Дистанция напыления, мм	Толщина покрытия, мкм	Адгезионная прочность, МПа	Коррозионная стойкость, сут
1	0,1	0,05	30	50	9,4	18,2
2	0,1	0,05	200	300	2,5	33,7
3	0,1	0,3	100	200	6,9	35,5
4	0,1	0,3	150	100	10,4	30,7
5	0,25	0,1	100	200	10,3	29,4
6	0,25	0,1	150	300	6,8	42,3
7	0,25	0,2	30	50	13,1	24,7
8	0,25	0,2	200	100	15,8	35,8
9	0,4	0,1	200	300	4,9	40,3
10	0,4	0,1	30	100	10,7	35,1
11	0,4	0,2	100	50	14,9	21
12	0,4	0,2	150	200	9,6	30,8
13	0,5	0,05	150	50	10,7	20,8
14	0,5	0,05	30	200	6,7	31,2
15	0,5	0,3	200	300	3,3	40,9
16	0,5	0,3	100	100	8,7	31,3

На основании приведенного исследования предложены следующие причинно-следственные многокритериальные модели двух технологических систем:

– для системы нанесения покрытия «полимер-НАДС»

$$K_1 = -1649,015 + 5,707P_1 + 15,744P_2 + 190,493P_3 + 95,240P_4 - 0,103P_1^2 - 0,146P_2^2 - 10,201P_3^2 - 28,078P_4^2 + 6,014E-04P_1^3 + 7,893E-05P_2^3 + 0,173P_3^3 + 2,063P_4^3 - 1,431E-02P_1P_2 + 7,545E-02P_1P_4;$$

$$K_2 = 44682,880 - 274,615P_1 - 988,125P_2 - 3997,108P_3 - 2474,594P_4 + 4,280P_1^2 + 21,020P_2^2 + 222,230P_3^2 + 807,463P_4^2 - 1,974E-02P_1^3 - 0,146P_2^3 - 3,828P_3^3 - 64,482P_4^3 + 0,1513P_2P_4 - 6,729P_3P_4.$$

Погрешности аппроксимации для $K_1 - 3,0 \%$; $K_2 - 2,7 \%$;

– для системы нанесения покрытия «полимер-ША-А»

$$K_1 = -52,272 + 0,947P_1 + 9,232P_2 - 9,129P_3 - 15,293P_4 - 0,171P_1^2 - 0,193P_2^2 + 0,398P_3^2 + 3,575P_4^2 + 9,037E-02P_1^3 + 1,261E-03P_2^3 - 5,476E-03P_3^3 - 0,258P_4^3 - 1,219E-04P_1P_2P_4 + 6,159E-04P_1P_3P_4;$$

$$K_2 = -1757,271 + 59,881P_1 - 30,016P_2 + 266,047P_3 - 133,461P_4 - 0,270P_1^2 + 0,947P_2^2 + 1,256P_3^2 + 15,036P_4^2 - 0,242P_1P_2 - 0,174P_1P_3 - 0,275P_1P_4 - 0,468P_2P_3 - 0,791P_2P_4 + 0,020P_1P_2P_3.$$

Погрешности аппроксимации для $K_1 - 6,1 \%$; $K_2 - 4,5 \%$.

Выбор технически оптимального режима нанесения композиционного покрытия осуществлялся в результате решения обратной многокритериальной задачи по определению номинальных значений технологических параметров P_1-P_4 и предельно возможного отклонения от номинала, при котором обеспечивается требуемое значение качества по показателям K_1-K_2 .

Выбор технически оптимального варианта технологического режима программой СИНТЕЗ МК выполняется в автоматическом режиме. По выбранному варианту предоставляется типовой набор следующих сведений: значения параметров состава материала; область допустимых значений параметров состава; режимы технологии; область допустимых значений технологических режимов; характеристики создаваемого объекта; область возможных значений характеристик; показатели качества технологического процесса, в т. ч. уровень воспроизводимости свойств объекта; область возможных значений показателей качества. Кроме этого, выполняется построение дискретных портретов пространства управляющих параметров технологической системы. Путем решения обратной задачи определяется оптимальное пространство параметров.

Пространство оптимальных параметров определено в следующих границах:

для процесса нанесения наноконпозиционного покрытия «полимер-НАДС»: концентрация наноалмазов – 0,15–0,21 масс.%; давление горючих газов – 0,15–0,25 МПа; дистанция напыления – 83–113 мм; толщина покрытия – 97–111 мкм;

для процесса нанесения наноконпозиционного покрытия «полимер-ША-А»: концентрация наноалмазов – 0,18–0,26 масс.%; давление горючих газов – 0,20–0,30 МПа; дистанция напыления – 71–101 мм; толщина покрытия – 110–134 мкм.

Составлены технологические карты процесса нанесения композиционного покрытия, режимы которого обеспечивают получение покрытий с заданными свойствами (табл. 5, 6).

Таблица 5. – Технологическая карта режимов процесса получения наноконпозиционного покрытия «полимер-НАДС»

Параметры техпроцесса	Номинальное значение	Допуск на номинал
Концентрация НАДС, масс.%	0,18	±0,03
Давление горючей смеси, МПа	0,20	±0,05
Дистанция напыления, мм	98	±15
Толщина покрытия, мкм	104	±7

Таблица 6. – Технологическая карта режимов процесса получения наноконпозиционного покрытия «полимер-ША-А»

Параметры техпроцесса	Номинальное значение	Допуск на номинал
Концентрация ША-А, масс.%	0,22	±0,04
Давление горючей смеси, МПа	0,25	±0,05
Дистанция напыления, мм	86	±15
Толщина покрытия, мкм	122	±12

Проверка адекватности разработанных экспериментально-статистических моделей процесса газотермического нанесения композиционных полимер-наноалмазных покрытий для двух вариантов наноразмерного алмазного модификатора (НАДС и ША-А) в выбранном пространстве параметров оптимизации (концентрация наноразмерного модификатора, давление горючей смеси, дистанция напыления, толщина покрытия) с различным сочетанием их значений в установленном для каждого из них диапазоне осуществлялась путем сопоставления уровня свойств натуральных образцов композиционных покрытий с результатами компьютерного эксперимента (расчета). Значения технологических параметров, принятых в компьютерном и натурном экспериментах, приведены в таблице 7.

Таблица 7. – Условия эксперимента для оценки воспроизводимости свойств

Вариант	Концентрация модификатора, масс. %	Давление горючей смеси, МПа	Дистанция напыления, мм	Толщина покрытия, мкм
Модификатор НАДС				
1	0,2	0,2	100	100
2	0,15	0,15	90	110
3	0,2	0,25	110	105
Модификатор ША-А				
4	0,25	0,3	90	130
5	0,2	0,2	80	110
6	0,2	0,25	100	120

Свойства покрытий для натуральных образцов были определены по тем же методикам, которые использовались для определения критериев работоспособности покрытий при первичном эксперименте в пространстве управляющих параметров. Установлено, что при поддержании технологических режимов в заданных оптимальных интервалах (допусках) вероятность получения годных (соответствующих требованиям ТЗ) покрытий составляет 100 %, все значения критериев работоспособности лежат внутри допустимых интервалов. Результаты испытаний приведены в таблице 8.

Таблица 8. – Показатели качества покрытий, изготовленных по режимам в пределах полей допусков

Вариант	Способ определения показателя	Адгезионная прочность, МПа	Коррозионная стойкость, сут
1	расчет	10,8	35,8
	эксперимент	12,3	39,6
2	расчет	14,6	37,7
	эксперимент	13,5	39,4
3	расчет	12,9	36,3
	эксперимент	13,5	38,9
4	расчет	11,8	39,9
	эксперимент	12,9	35,2
5	расчет	14,5	38,0
	эксперимент	13,7	39,9
6	расчет	14,6	35,3
	эксперимент	13,1	38,7

Полученные данные натурального эксперимента подтверждают, что свойства композиционных покрытий, изготовленных по технологическим картам оптимальных параметров и измеренных в соответствии с разработанными методиками, находятся внутри допустимых интервалов критериев работоспособности (адгезионная прочность – 10–15 МПа; коррозионная стойкость – 35–40 сут). Отклонения расчетных значений критериев качества от соответствующих измеренных значений для натуральных образцов не превышают 15 %.

Выводы. Разработана экспериментально-статистическая математическая модель процесса газотермического напыления композиционного полимер-наноалмазного покрытия, в которой в качестве управляющих параметров (независимых переменных) приняты следующие материаловедческие и конструктивно-технологические факторы: концентрация модификатора в исходной полимер-наноалмазной порошковой композиции (масс. %), давление горючей смеси (МПа), дистанция напыления (мм) и толщина покрытия (мкм), а критериями оптимизации (показателями качества) являются адгезионная прочность (МПа) и коррозионная стойкость (сут).

С использованием полученных уравнений регрессии рассчитаны пространства оптимальных параметров процессов газотермического нанесения композиционных полимер-наноалмазных покрытий на полиамидной матрице с различными видами наноалмазного модификатора, удовлетворяющих заданным показателям качества ($\sigma_{сц} = 10,0\text{--}15,0$ МПа, $K = 35\text{--}40$ сут), в следующих границах:

для покрытия «полимер-НАДС»: концентрация наноалмазов – 0,15–0,21 масс.%; давление горючих газов – 0,15–0,25 МПа; дистанция напыления – 83–113 мм; толщина покрытия – 97–111 мкм;

для покрытия «полимер-ША-А»: концентрация наноалмазов – 0,18–0,26 масс.%; давление горючих газов – 0,20–0,30 МПа; дистанция напыления – 71–101 мм; толщина покрытия – 110–134 мкм.

Проверка адекватности разработанной модели показала, что отклонения расчетных значений критериев качества от соответствующих измеренных значений для натуральных образцов не превышают 15 %.

Разработанная экспериментально-статистическая математическая модель процесса газотермического напыления композиционного полимер-наноалмазного покрытия применима при обработке состава и технологических режимов нанесения коррозионно-стойких покрытий на поверхности подверженных коррозии деталей мобильных машин, технологического оборудования и металлоконструкций различного функционального назначения, включающих пожарные автоцистерны, стационарные емкости для хранения огнетушащих веществ и другие средства пожарно-технического вооружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Довгяло, В.А. Композиционные материалы и покрытия на основе дисперсных полимеров. Технологические процессы / В.А. Довгяло, О.Р. Юркевич. – Минск: Наука і тэхніка, 1992. – 256 с.
2. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / М.Л. Кербер [и др.]; под ред. А.А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2009. – 556 с.
3. Протасов, В.Н. Теория и практика применения полимерных покрытий в оборудовании и сооружениях нефтегазовой отрасли: монография / В.Н. Протасов. – М.: Недра, 2007. – 374 с.
4. Grainger, S. Engineering coatings: Design and application (Second edition) / S. Grainger, J. Blunt. – Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013. – 336 p.
5. Шабанова, В.П. Химия и физика полимеров со специальными свойствами: учеб. пособие / В.П. Шабанова. – Волгоград: РПК Политехник, 2004. – Ч. 2. – 63 с.
6. Автофоретическое формирование полимерных покрытий на поверхности алюминия и его сплавов / С.С. Симунова [и др.] // Изв. вузов. Сер. Химия и хим. технол. – 2008. – Т. 51, Вып. 5. – С. 27–30.
7. Долматов, В.Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза. Получение, свойства, применение / В. Ю. Долматов. – СПб.: СПбГПУ, 2003. – 344 с.
8. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П.А. Витязь [и др.]; под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 381 с.
9. Белоцерковский, М.А. Исследование возможности нанесения композиционных полимерных покрытий термораспылением экструдатов / М.А. Белоцерковский, А.В. Чекулаев // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Прикладные науки. – 2005. – № 6. – С. 79–83.
10. Андреева, А.В. Адгезия в полимерных композиционных материалах: метод. указания / А.В. Андреева. – Саратов: Саратовский гос. тех. ун-т, 2011. – 26 с.
11. Vityaz, P.A. Computer methodology of systematic optimization designing of technological systems «rawmaterial–technology–final material» / P.A. Vityaz, O.V. Zhilinsky, T.V. Laktushina // International Workshop «Mesomechanics: fundamental and applications» (MESO 2003) and the VII International Conference «Computer Aided Design of Advanced Materials and Technologies» (CADAMT'2003), August 18–23, 2003. – Tomsk, Russia: Institute of Strength Physics and Materials Science, SB RAS. – P. 174–176.

OPTIMIZATION OF THE GAS-THERMAL SPRAY PROCESS POLYMERIC COATINGS MODIFIED BY NANOALAMASE

Gennadii Varikov

Kiril Drozd

The State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Minsk, Belarus

Victor Zhornik, Grand PhD in Technical Sciences

The State Scientific Institution «Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus», Minsk, Belarus

Purpose. To evaluate the optimization of the process of gas-thermal spraying of polymer coatings modified with nanodiamonds. The research task was the choice of methods for applying polymer coatings, determined by the geometric parameters of the parts and products to be coated, their design and technological features, the conditions of future operation, and the required thickness of the functional polymer layer.

Methods. When developing a mathematical model for the process of gas-thermal spraying of a nanocomposite polymer coating for the purpose of determining optimal technological conditions, a multidimensional project synthesis method was used that takes into account the features of a real nanotechnological system.

Finding. An effective method of increasing the physical, mechanical, and anticorrosion properties of applied coatings from metals, alloys, and plastics is their modification by nanoscale components.

Application field of research. The use of coating technology from thermoplastic polymers to protect against corrosion and wear is one of the effective ways to improve the durability of machine parts and structural elements. Coatings formed by dispersed polymers successfully replace paint, galvanic and obtained by gummying.

Conclusions. The experimental-statistical mathematical model of the process of gas-thermal spraying of a composite polymer-nanodiamond coating was developed where the following materials and structural and technological factors were adopted as control parameters (independent variables): modifier concentration in the initial polymer-nanodiamond powder composition (mass %), pressure (MPa), inflow distance (mm), coating thickness (μm). The optimization criteria (quality indicators) are the following coating characteristics: adhesion strength (MPa) and corrosion resistance (days).

Keywords: computer simulation, multidimensional project synthesis, polymer-nanodiamond coating, optimization, spraying conditions, quality parameters.

(The date of submitting: August 1, 2018)

REFERENCES

1. Dovgialo A.V., Yurkevich O.R. *Kompozitsionnye materialy i pokrytiya na osnove dispersnykh polimerov. Tekhnologicheskie protsessy* [Composite materials and coatings based on dispersed polymers. Technological processes]. Minsk: Navuka i tekhnika, 1992. 256 p. (rus)
2. M. L. Kerber [and al.] *Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya* [Polymer composite materials: structure, properties, technology]. Ed. by. A.A. Berlina. Saint Petersburg: Professiya, 2009. 556 p. (rus)
3. Protasov V.N. *Teoriya i praktika primeneniya polimernykh pokrytiy v oborudovanii i sooruzheniyakh neftegazovoy otrasli* [Theory and practice of application of polymer coatings in equipment and facilities of the oil and gas industry]. Moscow: Nedra, 2007. 374 p. (rus)
4. Grainger S., Blunt J. *Engineering coatings: Design and application (2nd ed.)*. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013. 336 p.
5. Shabanova V.P. *Khimiya i fizika polimerov so spetsial'nymi svoystvami: ucheb.posobie* [Chemistry and physics of polymers with special properties]: tutorial. Volgograd: RPK Politekhnik, 2004. Part 2. 63 p. (rus)
6. Simunova S.S., Gorshkov V.K., Mesnik M.O., Pavlov E.A. Avtoforeticheskoe formirovanie polimernykh pokrytiy na poverkhnosti alyuminiya i ego splavov [Autophoretic formation of polymer coatings on the surface of aluminum and its alloys]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya «Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya»*, 2008. Vol. 51, Iss. 5. Pp. 27–30. (rus)
7. Dolmatov V.Yu. *Ul'tradispersnye almayı detonatsionnogo sinteza. Poluchenie, svoystva, primeneniye* [Ultradispersed diamonds of detonation synthesis. Receiving, properties, applying]. Saint Petersburg: SPbGPU, 2003. 344 p. (rus)

8. Vityaz' P.A. *Nanoalmazny detonatsionnogo sinteza: poluchenie i primeneniye* [Detonation synthesis nanodiamonds: preparation and use]. Ed. by P.A. Vityaz'. Minsk: Belaruskaya navuka, 2013. 381 p. (rus)
9. Belotserkovskiy M.A., Chekulaev A.V. Issledovanie vozmozhnosti naneseniya kom-pozitsionnykh polimernykh pokrytiy termoraspyleniemekstrudatov [Study of the possibility of applying composite polymer coatings by thermal spraying of extrudates] *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Prikladnye nauki*, 2005. No. 6. Pp. 79–83. (rus)
10. Andreeva A.V. *Adgeziya v polimernykh kompozitsionnykh materialakh. Metodicheskie ukazaniya* [Adhesion in polymer composite materials]: methodical instructions. Saratov: Saratovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2011. 26 p. (rus)
11. Vityaz P.A., Zhilinsky O.V., Laktiushina T.V. Computer methodology of systematic optimization designing of technological systems «rawmaterial–technology–final material». *International Workshop «Mesomechanics: fundamental and applications» (MESO 2003) and the VII International Conference «Computer Aided Design of Advanced Materials and Technologies» (CADAMT 2003), August 18–23, 2003*. Tomsk, Russia: Institute of Strength Physics and Materials Science, SB RAS, 2003. Pp. 174–176.