

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.4+621.793.1

Оптимизация по критериям прочности плазменного напыления эрозионно стойких покрытий

Е. К. Соловых^а, Б. А. Ляшенко^б, Ю. В. Дмитриев^в, Ю. С. Борисов^г

^а Кировоградский национальный технический университет, Кировоград, Украина

^б Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^в ООО НТП “АгроСофт”, Киев, Украина

^г Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

Установлено, что механические характеристики покрытий зависят от технологических режимов их нанесения. Предложена методика оптимизации и управления технологическим процессом по критериям прочности и материалоемкости на примере плазменного напыления эрозионно стойких покрытий. Эрозионная стойкость наиболее устойчиво коррелирует с когезионной прочностью покрытий. Из уравнений регрессии определены максимальные значения когезионной прочности покрытий и эрозионной стойкости при оптимальном сочетании технологических параметров.

Ключевые слова: покрытия, прочность, газотермическое напыление, эрозионная стойкость, оптимизация.

Введение. Разработка любого технологического процесса (ТП) неизбежно связана с решением оптимизационных задач. В области создания упрочняющих защитных покрытий (УЗП) вопросы оптимизации занимают ключевое место. Это обусловлено тем, что многочисленные способы нанесения покрытий в сочетании с обширной номенклатурой материалов, из которых их формируют, и большое количество влияющих факторов предоставляют технологам ряд альтернативных вариантов. В таком случае эффективность принимаемых решений будет зависеть от наличия критериев прочности для управления технологическим процессом.

Состояние проблемы. Ввиду высокой чувствительности механических характеристик покрытий и основы к режимам их нанесения предъявляется особое требование к оптимизации и ведению технологического процесса по критериям прочности. Относительно влияния технологических режимов на служебные свойства УЗП имеются противоречивые данные [1]. Поэтому предпринимались попытки систематизировать технологические параметры в виде карт источников влияния на свойства покрытий [2] и иерархических схем параметров [3]. Поиск оптимума и установлению связей между

технологическими режимами и свойствами посвящены работы [4–8], в том числе по стойкости газотермического покрытия в условиях газоабразивного изнашивания [9].

В связи с применением средств вычислительной техники в системах автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) и автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) образовались своеобразные “ножницы” между возможностями компьютера и его использованием. Актуальной становится разработка математических моделей и программного обеспечения. Моделирование основано на методах теории планирования эксперимента с использованием средств вычислительной техники. Однако разрабатываемые математические модели для САПР ТП и АСУ ТП не охватывают многих явлений, определяющих эксплуатационные свойства УЗП. Они, как правило, рассматривают отдельные характеристики покрытий, оптимизацию отдельных свойств. Разрабатываемые для газотермического напыления модели имеют также ограниченный характер [10, 11].

В теории, технологии и практике УЗП сложилось и успешно развивается новое направление – оптимизация технологических процессов по критериям прочности [12]. Применение многопараметрической оптимизации методом факторного планирования эксперимента позволяет определить технологические параметры, обеспечивающие максимально возможную прочность и долговечность детали с покрытием.

Особенность нового направления заключается в проведении исследования по единой матрице планирования эксперимента с учетом технологических факторов, комплекса механических и эксплуатационных характеристик. Таким образом, сосредоточены “в одних руках” технология УЗП и комплекс испытаний.

Оптимизация технологических процессов по комплексному критерию сопротивления усталости, износу и коррозионной стойкости проводилась для газотермических покрытий [13, 14]. Технология детонационного напыления оптимизирована по критерию адгезионно-когезионной равнопрочности и критической деформации основы [15–17], по комплексу механических и эксплуатационных свойств [18, 19]. Электронно-лучевая технология теплозащитных покрытий оптимизирована по критериям изотермической и термодинамической ползучести [17, 20]. Для условий работы деталей при трении качения с проскальзыванием построены множественные регрессионные модели, характеризующие зависимость параметров оптимизации от входных технологических и эксплуатационных факторов [21]. По критериям прочности оптимизированы технология ионного азотирования [22] и вакуум-плазменная технология [1, 23–25], по критериям прочности, напряженно-деформированному состоянию и износостойкости – параметры электрохимической технологии [26], электроискрового легирования [27] и поверхностного пластического деформирования [28].

Согласно технологическим условиям достижение максимальной прочности и долговечности должно сопровождаться снижением энергетических и других материальных затрат. Поэтому при многокритериальной оптимизации кроме критериев прочности используют экономические критерии.

Детонационное напыление наряду с критериями прочности оптимизировано также по себестоимости [16].

Существенное повышение прочности и всех эксплуатационных характеристик при оптимизации ТП УЗП по критериям прочности свидетельствует об эффективности этого подхода. Поэтому, на наш взгляд, сложилась следующая ситуация в теории и практике использования УЗП:

подавляющее большинство технологических процессов выбрано именно эмпирически-интуитивно; принятые при этом технологические параметры не всегда обеспечивают максимальную и возможно достижимую прочность и долговечность детали с покрытием;

принятые технологические параметры не обеспечивают энергосбережение, экономию материалов и условия максимальной производительности;

установленные эмпирически-интуитивно технологические параметры следует принять за нулевую точку планирования эксперимента для последующего регрессионного анализа.

Цель работы заключается в создании для газотермического напыления антикавитационных покрытий методики оптимизации технологических процессов по критериям прочности, обеспечивающей достижение максимально возможной прочности и долговечности детали с покрытием при минимальных затратах на процесс его нанесения. Научная часть работы состоит в разработке математических моделей, базирующихся на критериях прочности, которые используются как основа для программного обеспечения САПР ТП газотермического напыления (ГТН) и АСУ ТП ГТН.

Методика исследования. В работе [29] предложена технология нанесения плазменного антикавитационного покрытия на внешнюю охлаждаемую поверхность гильзы двигателя СМД-18Н толщиной 0,4 мм из стали 12Х18Н10Т. Использование указанного материала авторы объясняют требованиями коррозионной стойкости. Поскольку обоснование выбранных технологических режимов и толщины напыляемого покрытия для серийного промышленного производства отсутствует, нет оснований утверждать, что эксплуатируемая технология оптимальна. Поэтому она была принята базовой для дальнейшей оптимизации по параметрам прочности и материалоемкости.

В работе [19] при планировании эксперимента по оптимизации детонационных покрытий в качестве входных параметров приняты технологические и эксплуатационные, в качестве критериев оптимизации – микротвердость, адгезионная прочность и интенсивность изнашивания. Большое количество используемых факторов (восемь) и функций отклика (три) увеличивают объем экспериментов и не позволяют выяснить роль конкретных механических характеристик покрытия. Поэтому в настоящей работе принят следующий подход:

в результате предварительных экспериментов определяется зависимость эрозионной стойкости от механических характеристик покрытия;

в качестве критерия оптимизации используется характеристика, от которой зависит эрозионная стойкость.

Накопленный опыт при исследовании эрозионной стойкости компактных материалов свидетельствует, что, несмотря на некоторые необъяснимые

отклонения, общая тенденция такова: сопротивление материалов эрозионному разрушению возрастает пропорционально таким механическим характеристикам, как твердость, прочность при растяжении, предел текучести, удлинение при разрыве, энергия деформации при разрушении [30, 31]. В связи с этим основное внимание будет уделено указанным механическим свойствам и адгезионной прочности – характеристике, аналога которой у компактных материалов нет.

С учетом приоритетного значения данных механических характеристик предложенный подход к настоящему исследованию реализовывался следующим образом. При неизменных режимах нанесения покрытия его формировали на образцах, предназначенных для измерения механических характеристик и определения кавитационной стойкости. Механические характеристики измеряли по методике, основанной на растяжении стандартного образца с нанесенным покрытием на половину рабочего участка [32–34]. Модуль упругости покрытия определяли по разности деформаций участка образца с покрытием и без покрытия, адгезионную и когезионную прочность – по деформации основы при отслоении или растрескивании покрытия.

Критерием кавитационной стойкости служила скорость эрозии на установленном участке, которую определяли на стандартной магнитоэрозионной ультразвуковой установке при частоте 18...20 кГц. Диаметр цилиндрического образца d с торцевой рабочей поверхностью составлял 25 мм.

Таким образом, проведение предварительных экспериментов обусловлено необходимостью выбора механического свойства покрытия в качестве критерия оптимизации.

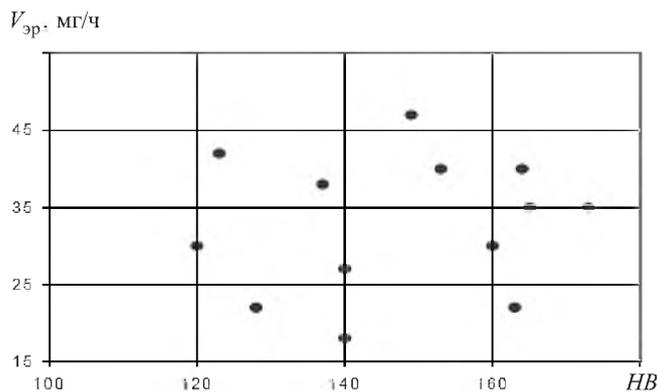
Зависимости скорости эрозии $V_{эр}$ от различных механических свойств приведены на рис. 1. Видно, что наиболее устойчивая корреляция наблюдается между скоростью эрозии и когезионной прочностью покрытий. Другие механические свойства использовать в качестве параметра, характеризующего эрозионную стойкость покрытий, некорректно, поскольку зависимость между ними не так ярко выражена. Следует отметить, что твердость покрытий вообще не коррелирует со скоростью эрозии, в то время как для тех же компактных материалов, получаемых по традиционной технологии, твердость признана наиболее приемлемым параметром.

Для изучения влияния адгезионной прочности на кавитационную стойкость материалов с покрытиями использовали три партии образцов. Материалы, составившие композицию, а также режимы нанесения покрытий приведены в табл. 1.

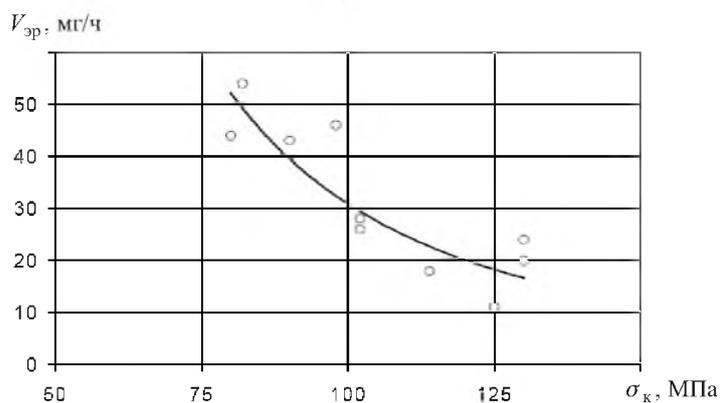
Условия нанесения покрытий на образцы, которые относятся к одной партии, отличались только качеством подготовки поверхности. В результате удалось при прочих равных условиях (в рамках одной партии) изменять адгезионную прочность в широких пределах. Механические характеристики покрытий представлены в табл. 2. Там же введена такая существенная характеристика системы основа–покрытие, как критическая деформация $\varepsilon_{кр}$ при разрушении покрытия.

Зависимости скорости эрозии $V_{эр}$ рассматриваемых покрытий от адгезионной прочности приведены на рис. 2. Полученные результаты показывают, что существует некоторое значение адгезионной прочности $\tau_{сц}^*$, кото-

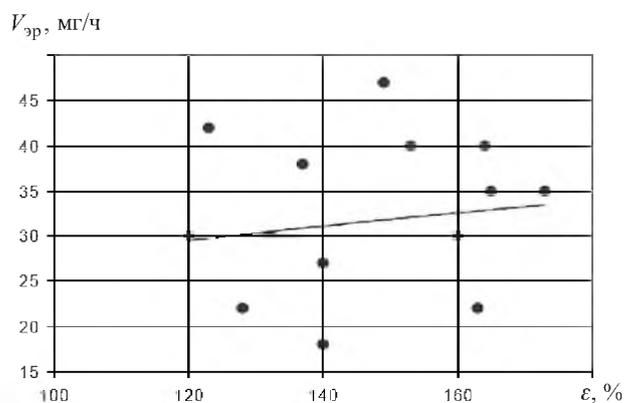
рое разбивает диапазон существования τ на два: $0 < \tau < \tau_{\text{сц}}^*$, в этом случае с ростом адгезионной прочности скорость эрозии интенсивно снижается; $\tau_{\text{сц}}^* < \tau < \tau_{\text{max}}$, скорость эрозии практически не зависит от значения τ . Такая закономерность объясняется изменением характера разрушения покрытия с адгезионно-когезионного на когезионное при превышении прочностью сцепления значения $\tau_{\text{сц}}^*$.



а



б



в

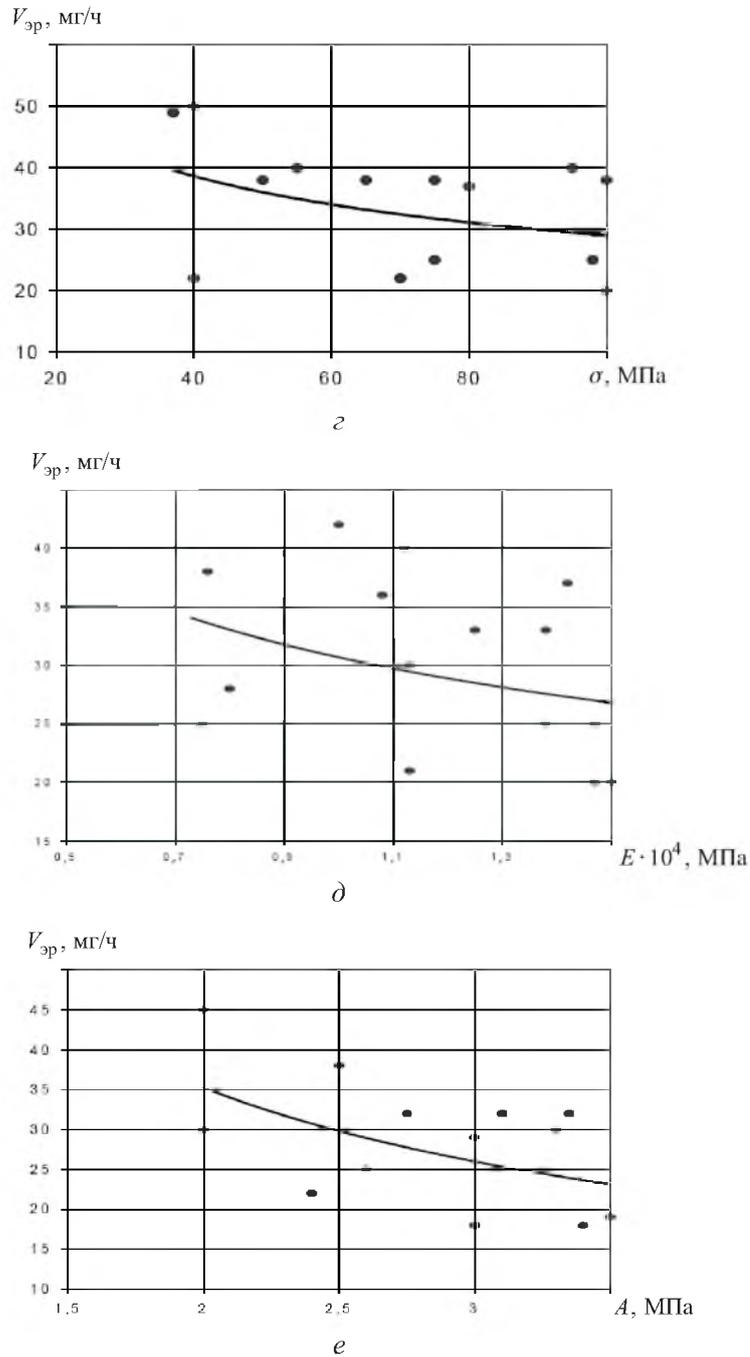


Рис. 1. Зависимость скорости эрозии $V_{эp}$ от твердости покрытия HB (а), его когезионной прочности σ_k (б), критической деформации основы ϵ (в), предела текучести σ (г), модуля Юнга E (д) и удельной работы деформации A (е).

Значение $\tau_{сц}^*$ соответствует оптимальному соотношению адгезионной и когезионной прочности покрытия, которое устанавливает критерий адгезионно-когезионной равнопрочности [35]. По этому критерию определяется

условие одновременного когезионного растрескивания и адгезионного отслоения. Таким образом полностью используются эти две характеристики в композиции основа–покрытие. Расчетные значения по критерию адгезионно-когезионной равнопрочности [35] (линии) и экспериментальные данные (точки) для $\tau_{\text{сц}}^*$ приведены на рис. 3.

Т а б л и ц а 1

Режимы нанесения покрытий

Материал основы (сталь)	Материал покрытия	N , кВт	L , мм	R , г/мин	$G_{\text{пл}}$, л/мин	v , мм/с	Количество проходов
20	Al_2O_3	24	85	30	40	40	3
45	12X18H10T	19	115	35	40	45	2–4
30	ПН65Ю15	21	140	45	30	30	2

Примечание. Здесь и в табл. 3: N – мощность плазмотрона; L – дистанция напыления; R – расход напыляемого материала; $G_{\text{пл}}$ – расход плазмообразующего газа; v – скорость перемещения плазмотрона.

Т а б л и ц а 2

Механические характеристики покрытий

Толщина покрытия h , мм	Когезионная прочность σ_k , МПа	Модуль Юнга $E_{\text{п}}$, ГПа	Деформация разрушения $\varepsilon_{\text{кр}}$, %
0,28	125	54	0,31
0,2...0,5	192	89	0,35
0,35	163	69	0,41

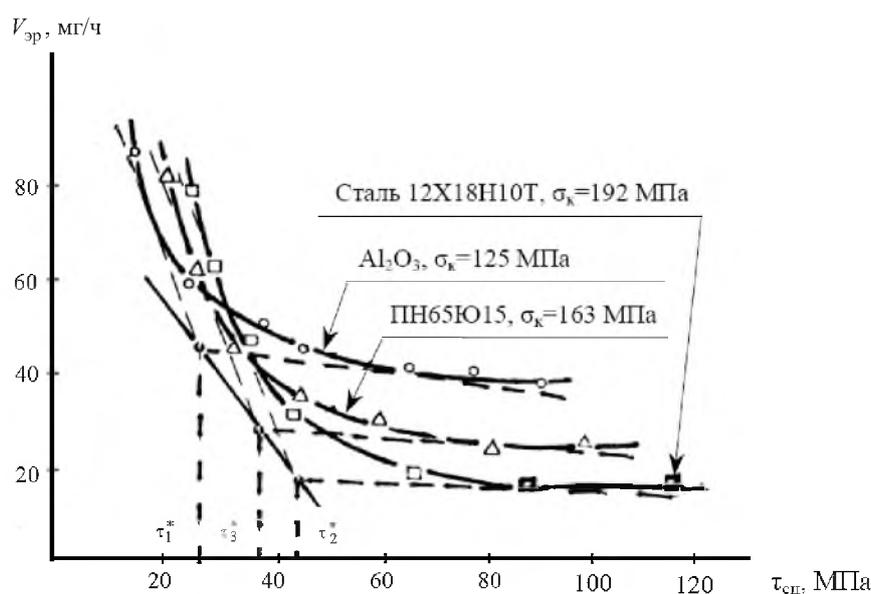


Рис. 2. Зависимость скорости эрозии $V_{\text{эп}}$ от прочности сцепления при сдвиге $\tau_{\text{сц}}$.

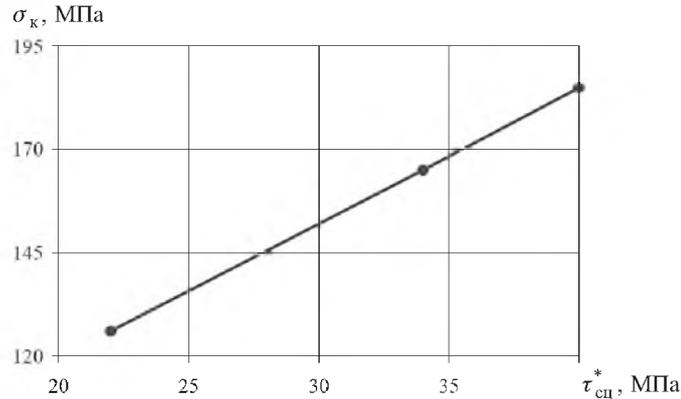


Рис. 3. Оптимальное соотношение адгезионной и когезионной прочности.

Для рассматриваемых условий кавитационного воздействия оптимальное соотношение адгезионной и когезионной прочности имеет вид

$$\tau_{сц}^* = 0,32\sigma_k.$$

Проведенные исследования позволяют сделать предварительные выводы: величина адгезионной прочности должна быть такой, чтобы обеспечить только когезионное разрушение покрытия в процессе эксплуатации; с повышением когезионной прочности кавитационная стойкость плазменных покрытий возрастает.

Поэтому в качестве критерия оптимизации газотермического напыления принята когезионная прочность покрытия σ_k . Однако, учитывая условия снижения материалоемкости технологического процесса, в качестве критерия оптимизации также принят коэффициент использования материала (КИМ).

На свойства газотермических покрытий влияют от 60 до 200 параметров процесса [36]. Для практического решения оптимизационной задачи необходимо выбрать те, которые оказывают доминирующее влияние на критерии оптимизации и допускают управление ими со стороны оператора.

Проведенный анализ позволяет выделить группу параметров для моделирования процесса газотермического напыления, которые наиболее влияют на величину когезионной прочности и КИМ. Для более точного определения КИМ в число варьируемых параметров не был включен расход напыляемого материала. Введение еще одного параметра увеличило бы объем экспериментов. В результате в матрицу планирования в качестве варьируемых параметров включены: мощность плазмотрона N ; дистанция напыления L ; расход плазмообразующего газа $G_{пл}$; расход охлаждающего газа $G_{охл}$. Последний параметр введен авторами на основании полученных данных по его влиянию на когезионную прочность.

Нанесение покрытий на образцы для исследования как механических характеристик, так и скорости эрозии осуществляли при следующих значениях кинематических параметров: $\omega = 100$ об/мин; $S = 2$ мм/об; $n = 2-3$. Изменение количества проходов обусловлено стремлением сохранить неизменной толщину покрытий (0,25...0,35) при изменяющемся КИМ.

Номинальные уровни варьируемых параметров установлены в соответствии с промышленной технологией напыления плазменных антикавитационных покрытий, принятой на эмпирически-интуитивной основе [29] для серийного производства. Таким образом, нулевая точка плана эксперимента соответствует тому промышленному техпроцессу, который полагали оптимальным. Значения уровней и интервалов варьирования выбранных параметров приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Значения уровней и интервалов варьирования параметров

Факторы	Уровень	N , кВт	L , мм	$G_{\text{пл}}$, л/мин	$G_{\text{охл}}$, л/мин
Код	–	X_1	X_2	X_3	X_4
Основной уровень	0	19	115	40	15
Интервал варьирования	ΔX_i	5	50	10	10
Верхний уровень	+1	24	165	50	25
Нижний уровень	–1	14	65	30	5

Примечание. Принятые критерии оптимизации обозначены кодами: X_1 – когезионная прочность σ_k , МПа; X_2 – коэффициент использования материала, %; $G_{\text{охл}}$ – расход охлаждающего газа.

Результаты исследований. На первом этапе исследования поставлен полный факторный эксперимент типа 2^4 . Однако исследуемые зависимости нельзя с достаточной точностью аппроксимировать полиномами первой степени. Поэтому выбран четырехфакторный симметричный некомпозиционный план второго порядка [37], который представляет собой комбинацию двухуровневых (–1, +1) полных факторных экспериментов с неполноблочным сбалансированным планом. Отметим, что данный план имеет нулевое значение фактора несферичности, т.е. является рототабельным, что позволяет с одинаковой точностью предсказывать значение функции отклика в любом направлении. Кроме того, план имеет сравнительно малое количество опытов: 27.

Расчет коэффициентов уравнений регрессии и проверку адекватности построенных моделей проводили по известным методикам [37]. После математической обработки матрицы планирования при 5%-ном уровне значимости коэффициентов полиномов получены уравнения регрессии:

$$Y_1 = 188,3 + 43,71X_1 - 16,58X_2 + 18,45X_4 + 26,25X_1X_4 + 18,72X_1 + \\ + 48,14X_2^2 + 10,62X_3^2 + 37,88X_4^2; \quad (1)$$

$$Y_2 = 71,7 + 12,83X_1 - 6,73X_2 - 7,715X_3 - 8,33X_1X_2 + 2,74X_1X_3 + \\ + 10,06X_1X_4 - 4,14X_1^2 - 6,89X_2^2 + 5,28X_3^2 - 9,75X_4^2. \quad (2)$$

Относительную степень влияния факторов на выходные параметры процесса можно представить в виде диаграмм для Y_1 (рис. 4) и Y_2 (рис. 5).

Когезионная прочность в значительной степени определяется факторами, определяющими температуру частицы в момент контакта ее с подложкой, а именно: мощностью плазмотрона и дистанцией напыления.

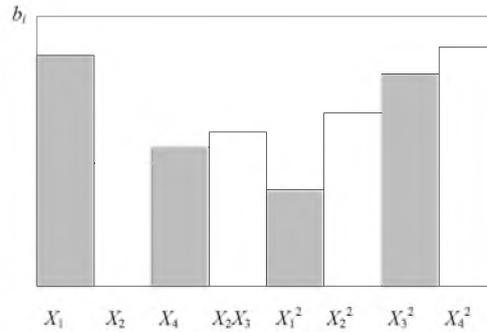


Рис. 4. Относительная степень влияния входных факторов на когезионную прочность σ_k .

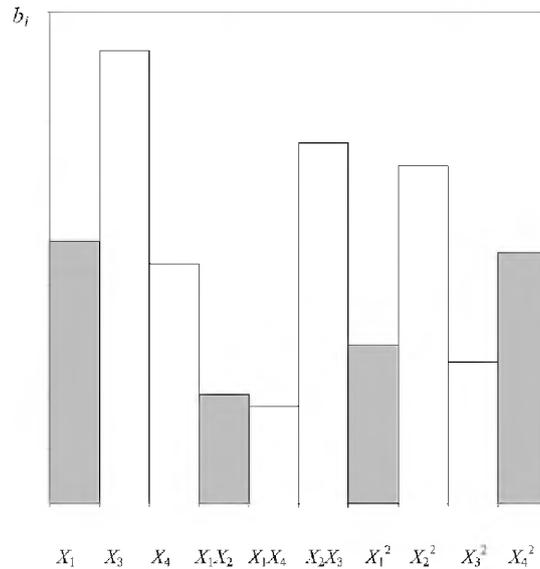


Рис. 5. Относительная степень влияния входных факторов на КИМ.

Полученные уравнения регрессии обычно имеют канонический (стандартный) вид.

После канонических преобразований уравнение для Y_1 запишем следующим образом:

$$Y_1 - 236,2 = 18,95X_1^2 + 17,09X_2^2 + 9,44X_3^2 + 14,37X_4^2, \quad (3)$$

для параметра КИМ –

$$Y_2 - 92,85 = -9,21X_1^2 - 3,99X_2^2 - 8,57X_3^2 - 3,41X_4^2. \quad (4)$$

Рассчитанные значения критериев оптимизации σ_k и КИМ в центре поверхности функции отклика Y_{1S} таковы:

$$\sigma_{k1S} = 236,2 \text{ МПа (максимальное значение),}$$

$$\text{КИМ}_{1S} = 69,98\%;$$

в центре поверхности функции отклика Y_{2S} :

$$\sigma_{k2S} = 164,7 \text{ МПа,}$$

$$\text{КИМ}_{2S} = 92,15\% \text{ (максимальное значение).}$$

При выборе режимов напыления принимали компромиссное решение: получение оптимально высокой когезионной прочности при обеспечении по возможности более высокого коэффициента использования напыляемого материала. Рассмотрим уравнения (1), (2) и рис. 4, 5. Несущественное влияние расхода плазмообразующего газа (X_3) на σ_k позволяет увеличить КИМ без значительного отклонения от координаты центра $X_{3S} = 0$ в сторону меньших расходов. Дистанцию напыления X_2 целесообразно оставить на прежнем уровне.

Зафиксировав факторы X_2 и X_3 на выбранных уровнях, получим уравнения регрессии, описывающие изменения σ_k и КИМ в зависимости от двух более значимых факторов (X_1 и X_4):

$$Y_1 = 212,5 + 43,71X_1 + 18,45X_4 - 26,25X_1X_4 - 18,72X_1^2 + 37,88X_4^2; \quad (5)$$

$$Y_2 = 83,13 + 12,83X_1 + 2,71X_4 + 10,06X_1X_4 - 4,14X_1^2 - 9,75X_4^2. \quad (6)$$

Анализ уравнений (5) и (6) проводили с помощью графического метода [37]. Для этого по предварительно рассчитанным значениям строили изолинии параметров Y_1 и Y_2 в двухмерном пространстве в координатах X_1 и X_4 .

Рис. 6 иллюстрирует зависимости σ_k и КИМ от значений мощности плазмотрона (X_1) и расхода воздуха при принудительном охлаждении (X_4). Хорда, соединяющая два центра поверхностей функций Y_1 и Y_2 – соответственно S_1 и S_2 , соответствует оптимальному решению. Область оптимальных значений σ_k и КИМ находится внутри изолиний $Y_1 = 215$ МПа и $Y_2 = 80\%$.

Выбранные режимы напыления соответствуют оптимальной точке центра ρ со значением критериев: $Y_1(\sigma_k) = 225,6$ МПа; $Y_2(\text{КИМ}) = 83,5\%$.

В натуральном масштабе имеем $X_1(N) = 21,75$ кВт ($I = 360 \dots 365$ А, $U = 58 \dots 60$ В); $X_4(G_{\text{охл}}) = 21$ л/мин.

Таким образом, проведенная оптимизация процесса напыления кавитационно-стойких покрытий позволила определить режимы их нанесения, соответствующие оптимальному сочетанию входных параметров процесса:

расход плазмообразующего газа 40 л/мин;

мощность плазмотрона 21,75 кВт (365 А, 60 В);

расход воздуха при принудительном охлаждении 21 л/мин;

дистанция напыления 105 мм.

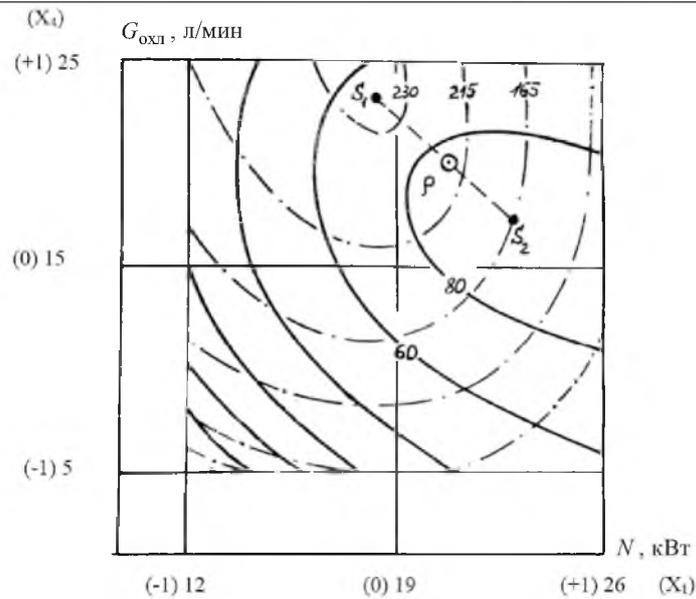


Рис. 6. Зависимости когезионной прочности σ_k и КИМ от значений мощности плазматрона (X_1) и расхода охлаждающего воздуха (X_4).

Значение выходных параметров при этом находилось на уровне $\sigma_{\text{к опт}} = 225,6$ МПа; КИМ = 79,2...82,0%.

Как и следовало ожидать, базовый вариант промышленной технологии газотермического напыления, принятой на эмпирически интуитивной основе, оказывается неоптимальным как по прочности (σ_k), так и по экономической характеристике (КИМ).

Для достижения одновременно наибольших показателей σ_k и КИМ необходимо изменить входные параметры:

- мощность N плазматрона повысить на 14,5%;
- дистанцию напыления L уменьшить на 8,7%;
- расход охлаждающего воздуха $G_{\text{охл}}$ увеличить на 40%.

Стендовые испытания по ускоренной методике [29] показывают, что эрозионная стойкость гильзы с покрытием, нанесенным по оптимальным режимам, составила 16000 моточасов, в то время как определяемая по аналогичной методике кавитационная стойкость гильзы с покрытием, нанесенным в соответствии с действующим техпроцессом, находилась на уровне 8000 моточасов.

Использование технологии нанесения антикавитационных покрытий на гильзы цилиндров двигателей внутреннего сгорания в оптимизированном варианте позволяет уменьшить толщину защитного покрытия в два раза, сохранив при этом кавитационную стойкость гильзы с покрытием на том же уровне.

Заключение. На примере газотермического напыления эрозионно стойких покрытий из стали 12Х18Н10Т на внешнюю поверхность гильзы цилиндра дизеля типа СМД предложена методика оптимизации технологического процесса по критериям прочности:

при математическом планировании эксперимента в качестве функции отклика принимается когезионная прочность покрытия σ_k при соблюдении оптимального соотношения с адгезионной прочностью $\tau_{\text{сц}}^*$. Именно эти критерии наиболее коррелируют с эрозионной стойкостью;

исходя из условий снижения материалоемкости в качестве еще одного критерия оптимизации принимается КИМ;

в качестве нулевого плана эксперимента используется промышленная технология, режимы которой установлены на эмпирической основе;

из уравнений регрессии определены условия получения максимальной прочности σ_k при максимальном КИМ.

Стендовые испытания покрытий, нанесенных по оптимальным технологическим режимам, показывают, что долговечность покрытия увеличивается в два раза при уменьшенной во столько же раз его толщине только за счет коррекции технологических параметров.

Резюме

Установлено, що механічні характеристики покриттів залежать від технологічних режимів їх нанесення. Запропоновано методику оптимізації й управління технологічним процесом за критеріями міцності і матеріалоемності на прикладі плазмового напилення ерозійно стійких покриттів. Ерозійна стійкість найбільш стабільно корелює з когезійною міцністю покриття. Из рівняння регресії визначено максимальні значення когезійної міцності покриття й ерозійної стійкості за оптимального співвідношення технологічних параметрів.

1. Будилов В. В., Мухин В. С., Минаева О. Б. Защитные свойства вакуумных ионно-плазменных покрытий на лопатках компрессоров ГТД // *Авиац. пром-сть.* – 1995. – № 3-4. – С. 41 – 45.
2. Huston R. P. Role of designed experiments to evaluate factors that influence measured properties of sprayed coatings // *Proc. of NTSC'90.* – 1990. – P. 675 – 680.
3. Heiman R., Lamy D., and Sopkow T. N. Parameter optimization of alumina-titania coatings by a statistical experimental design // *Proc. of NTSC'90.* – 1990. – P. 491 – 496.
4. Steeper T., Riggs W., and Tagushi A. Design of experiment study of plasma sprayed coatings // *Proc. of NTSC'93.* – 1993. – P. 31 – 36.
5. Bisgaard S. Optimizing thermal spray processes – going beyond Tagushi methods // *Proc. of NTSC'90.* – 1990. – P. 661 – 665.
6. Vuoristo P., Ahmaniemi S., et al. Optimization and monitoring of spray parameters by a CCD camera based imaging thermal spray monitor // *Proc. of ITSC'2001.* – 2004. – P. 727 – 735.
7. Bulancea D., Bukancea V., Alexandru I., and Condurache D. The optimizing of the superficial cold-burst hardening process of the inner cylindrical metallic surface by knocking with centrifuged balls // *Proc. of ITSC'2000.* – 2000. – P. 957 – 962.

8. *Blein F., Roussel E., and Freslon A.* Experimental design based on McLean and Anderson modeling applied to the prediction of plasma properties // Proc. of 15th ITSC'98. – 1998. – P. 881 – 886.
9. *Matthews S. J. and Hyland M. M.* Statistical optimization of HVOF sprayed Cr₃C₂-NiCr coatings for minimizing decarburization // Proc. of ITSC'2000. – 2000. – P. 543 – 549.
10. *Карасев М. В., Черных Ю. К.* Многокритериальная оптимизация параметров воздушно-дугового плазматрона для напыления покрытий // Свар. пр-во. – 1991. – № 6. – С. 39 – 41.
11. *Харламов М. Ю.* Підвищення ефективності технологічних процесів детонаційного напилювання покриттів на основі комплексної математичної моделі: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Київ, 2005. – 21 с.
12. *Оптимизация технологических процессов по критериям прочности:* Межвуз. темат. науч. сб. – Уфа, 1987. – 166 с.
13. *Методы и средства упрочнения поверхностей деталей машин концентрированными потоками энергии.* – М.: Наука, 1992. – 405 с.
14. *Guessasma S., Montavon G., and Coddet C.* Modeling of the ARS plasma spray process using artificial neural networks: basis, requirements, and an example // Comput. Mater. Sci. – 2004. – **29**, No. 3. – P. 315 – 333.
15. *Ляшенко Б. А., Ермолаев В. В., Долгов Н. А.* Оптимизация составов и технологии нанесения износостойких покрытий по критерию адгезионно-когезионной равнопрочности // II Междунар. симп. по трибофатике: Тез. докл. – М., 1996. – С. 58 – 59.
16. *Ляшенко Б. А., Ермолаев В. В., Долгов Н. А.* Оптимизация технологических режимов нанесения покрытий по прочностным и экономическим критериям при восстановлении деталей машин // Междунар. науч. симп. в области ремонта машин, посвященный памяти академика Ю. Н. Петрова. – Кишинев, 1996. – С. 30 – 31.
17. *Ляшенко Б. А., Гречанюк Н. И., Долгов Н. А. и др.* Оценка ресурса и оптимизация износостойких и теплозащитных покрытий деталей ГТД // Междунар. конф. “Оценка и обоснование продления ресурса элементов конструкций”. – Киев, 2000. – С. 147 – 148.
18. *Щенетов В. В.* Повышение износостойкости детонационных покрытий путем оптимизации режимов напыления // Трение и износ. – 1999. – **11**, № 5. – С. 844 – 848.
19. *Щенетов В. В., Гулевец В. Д., Лопач С. М. та ін.* Математичне моделювання впливу технологічних та експлуатаційних факторів на формування покриттів // Проблеми тертя та зношування. – 2006. – Вип. 46. – С. 176 – 184.
20. *Ляшенко Б. А., Гречанюк Н. И.* Оптимизация и ресурс теплозащитных покрытий деталей ГТД // Оценка и обоснование продления ресурса элементов конструкций. – Киев: Ин-т пробл. прочности НАН Украины, 2002. – **2**. – С. 819 – 824.

21. *Замятин В. Ю.* Анализ влияния способов упрочнения на свойства исполнительных поверхностей деталей трения // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 3. – С. 3 – 10.
22. *Каплун В. Г., Семенюк Н. Ф., Паршенко А. В.* Оптимизация технологии ионного азотирования в безводородных средах по параметрам прочности // Управление триботехническими и прочностными свойствами механических систем. – Киев, 1990. – С. 113 – 118.
23. *Трапезон А. Г., Ляшенко Б. А., Рутковский А. В.* Оптимизация вакуум-плазменной технологии нанесения покрытий из титановых сплавов по усталостной и контактно-усталостной прочности // II Междунар. симп. по трибофатике. – М., 1996. – С. 65.
24. *Макаревич Е. В., Иващенко С. А., Фролов И. С.* Исследование процесса формирования напряжений в вакуумно-плазменных покрытиях на алюминиевых подложках // Материалы, технологии, инструмент. – 2002. – 7, № 2. – С. 30 – 33.
25. *Ляшенко Б. А., Трапезон А. Г., Ермолаев В. В. и др.* Использование ускоренных усталостных испытаний для оптимизации технологии нанесения упрочняющих покрытий // Проблемы и пути реализации научно-технического потенциала военно-промышленного комплекса. – Киев, 2000. – С. 103 – 104.
26. *Ляшенко Б. А., Алексюк М. М., Кузовков Е. Г.* Повышение долговечности деталей машин путем рационального конструирования защитных покрытий // I Междунар. конф. “Артиллерийские ствольные системы, боеприпасы, средства артиллерии разведки и управление огнем”. – Киев, 1997. – С. 118 – 131.
27. *Ляшенко Б. А., Антонюк В. С., Возненко В. В.* Математическое моделирование и оптимизация процесса электроискрового легирования при формировании дискретных покрытий // V Междунар. науч.-метод. конф. “Інтеграція освіти, науки та виробництва”. – Луцк, 2001. – С. 142 – 144.
28. *Чистяков А. В.* Повышение износостойкости и усталостной прочности поверхностей деталей при изготовлении и проведении ремонта машин и оборудования // Горн. информ.-анал. бюл. Моск. гос. горного ун-та. – 2004. – № 12. – С. 244 – 246.
29. *Даниленко В. А., Ищенко Е. И., Шалай А. Н. и др.* Защита от кавитации гильз цилиндров нанесением плазменного покрытия // Тракторы и с.-х. машины. – 1988. – № 1. – С. 54 – 56.
30. *Hobbs J. M.* Experience with a 20-ke Cavitation Erosion Test // ASTM STP 408. – 1967. – P. 159 – 179.
31. *Тирувенгадам А.* Обобщенная теория кавитационных разрушений: Тр. Амер. об-ва инженеров-механиков. Сер. Д. Техническая механика. – 1963. – 48. – № 3.
32. *Ляшенко Б. А., Дмитриев Ю. В., Богуш В. Н. и др.* Определение комплекса механических характеристик газотермических покрытий //

- Современные достижения в области техники и применения газотермических и вакуумных покрытий. – Киев, 1991. – С. 90 – 97.
33. *Ляшенко Б. А., Шаривкер С. Ю., Цыгулев О. В. и др.* Методика определения механических характеристик композиции металл–защитное покрытие // Пробл. прочности. – 1989. – № 8. – С. 113 – 115.
 34. *Дмитриев Ю. В.* Методологический подход к исследованию механических характеристик материалов с покрытиями: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1990. – 17 с.
 35. *Ляшенко Б. А.* О критериях адгезионно-когезионной равнопрочности и термостойкости защитных покрытий // Пробл. прочности. – 1980. – № 10. – С. 114 – 126.
 36. *Кудинов В. В., Пекшев П. Ю., Белащенко В. Е. и др.* Нанесение покрытий плазмой. – М.: Наука, 1990. – 408 с.
 37. *Новик Ф. С., Арсоф Я. Б.* Оптимизация процессов технологии металлов методом планирования экспериментов. – М.; София: Машиностроение; Техника, 1980. – 340 с.

Поступила 01. 03. 2007