

# ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.4+621.793.1

## Оптимизация по критериям прочности плазменного напыления эрозионно стойких покрытий

Е. К. Соловых<sup>а</sup>, Б. А. Ляшенко<sup>б</sup>, Ю. В. Дмитриев<sup>в</sup>, Ю. С. Борисов<sup>г</sup>

<sup>а</sup> Кировоградский национальный технический университет, Кировоград, Украина

<sup>б</sup> Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

<sup>в</sup> ООО НТП “АгроСофт”, Киев, Украина

<sup>г</sup> 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 магнитострикционной 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.

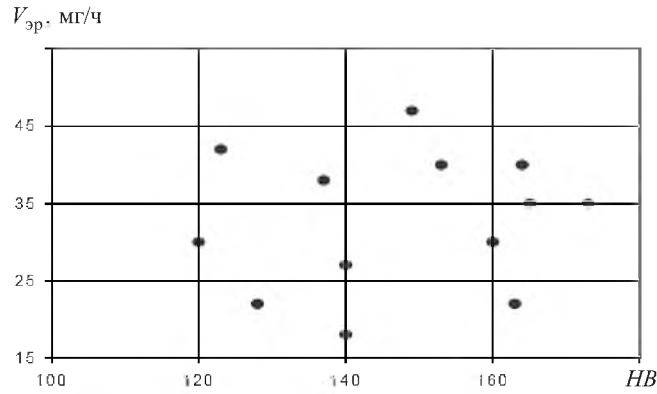
Зависимости скорости эрозии  $V_{эр}$  от различных механических свойств приведены на рис. 1. Видно, что наиболее устойчивая корреляция наблюдается между скоростью эрозии и когезионной прочностью покрытий. Другие механические свойства использовать в качестве параметра, характеризующего эрозионную стойкость 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.

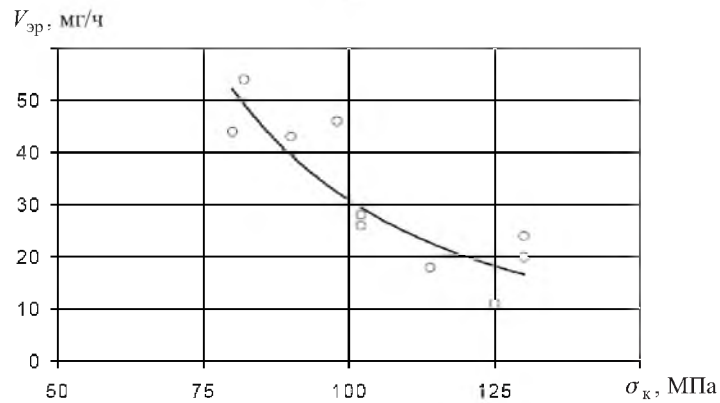
Условия нанесения покрытий на образцы, которые относятся к одной партии, отличались только качеством подготовки поверхности. В результате удалось при прочих равных условиях (в рамках одной партии) изменять адгезионную прочность в широких пределах. Механические характеристики покрытий представлены в табл. 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-

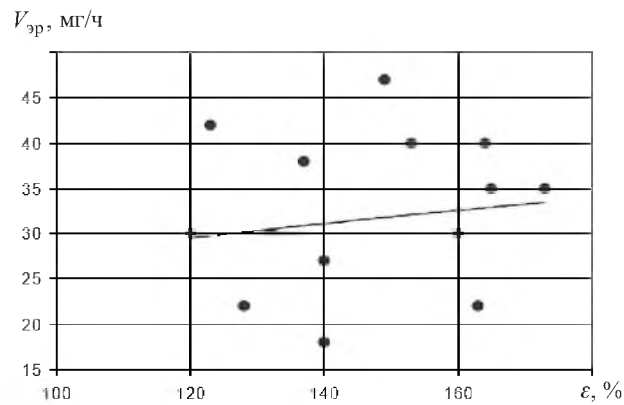
рое разбивает диапазон существования  $\tau$  на два:  $0 < \tau < \tau_{\text{сц}}^*$ , в этом случае с ростом адгезионной прочности скорость эрозии интенсивно снижается;  $\tau_{\text{сц}}^* < \tau < \tau_{\text{max}}$ , скорость эрозии практически не зависит от значения  $\tau$ . Такая закономерность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



а



б



в

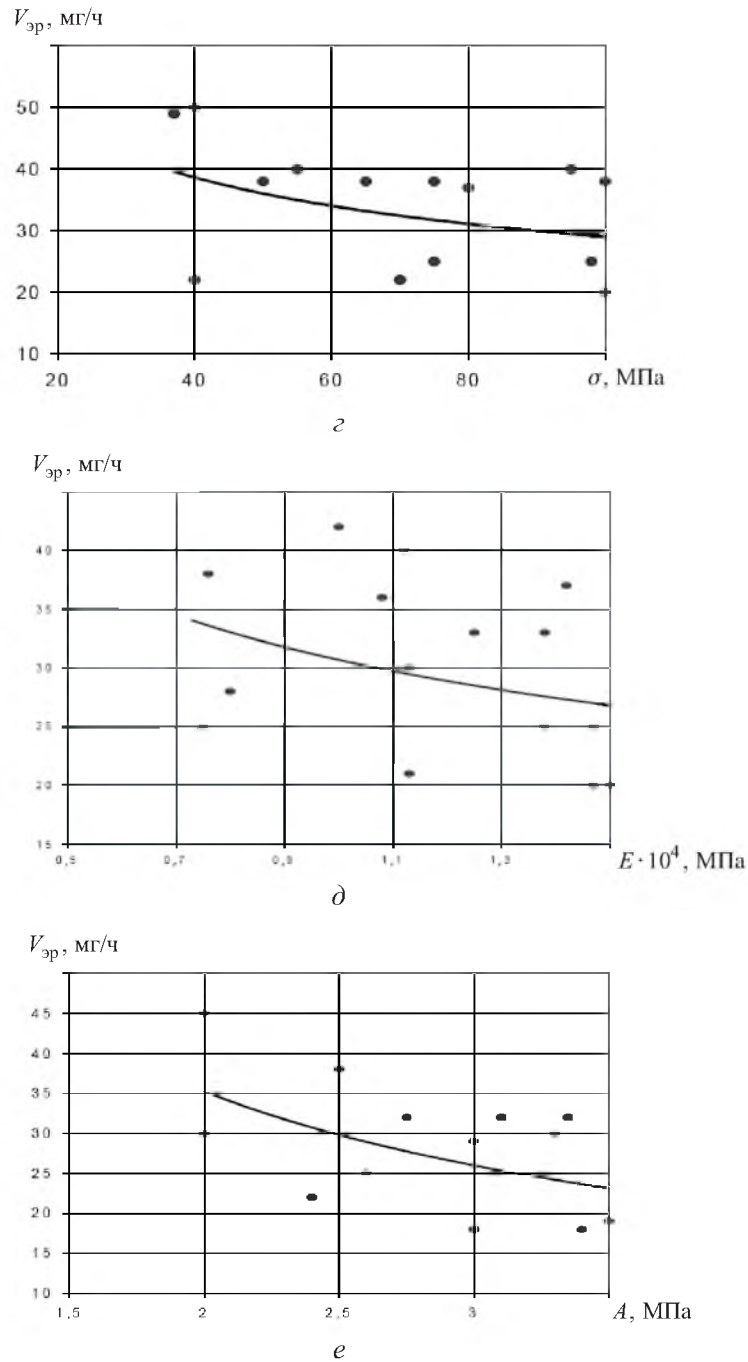


Рис. 1. Зависимость скорости эрозии  $V_{эp}$  от твердости покрытия  $HВ$  (а), его когезионной прочности  $\sigma_k$  (б), критической деформации основы  $\epsilon$  (в), предела текучести  $\sigma$  (г), модуля Юнга  $E$  (д) и удельной работы деформации  $A$  (е).

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  $\tau_{сц}^*$  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	$G_{пл}$ , л/мин	$v$ , мм/с	Количество проходов
20	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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;  $G_{пл}$  – расход плазмообразующего газа;  $v$  – скорость перемещения плазмотрона.

Т а б л и ц а 2

Механические характеристики покрытий

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

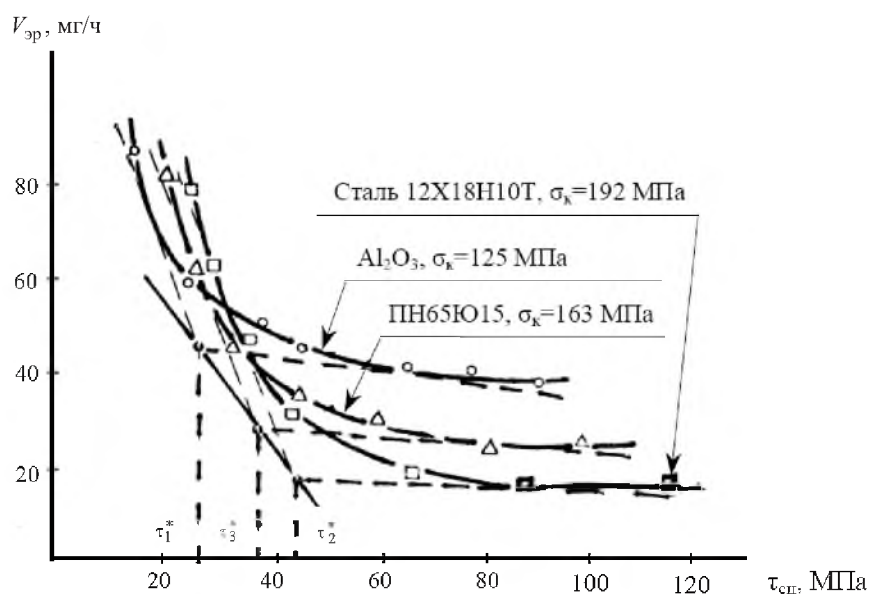


Рис. 2. Зависимость скорости эрозии  $V_{эп}$  от прочности сцепления при сдвиге  $\tau_{сц}$ .

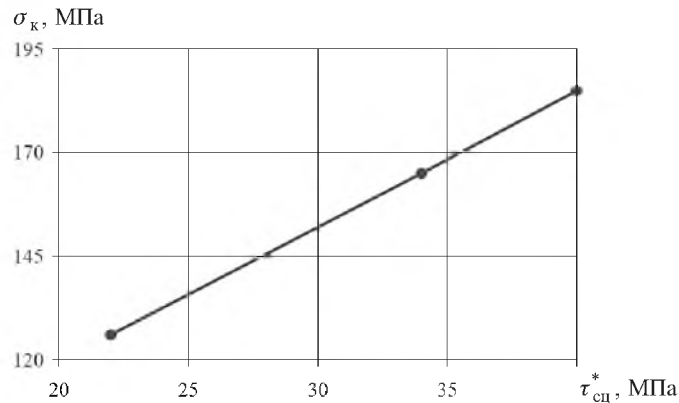


Рис. 3. Оптимальное соотношение адгезионной и когезионной прочности.

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

$$\tau_{сц}^* = 0,32 \sigma_к.$$

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  $\sigma_к$ . 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	$\Delta X_i$	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  $\sigma_k$ , 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.

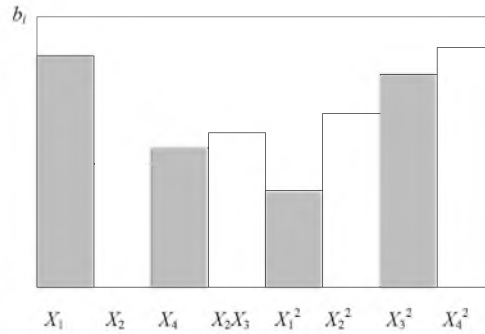


Рис. 4. Относительная степень влияния входных факторов на когезионную прочность  $\sigma_k$ .

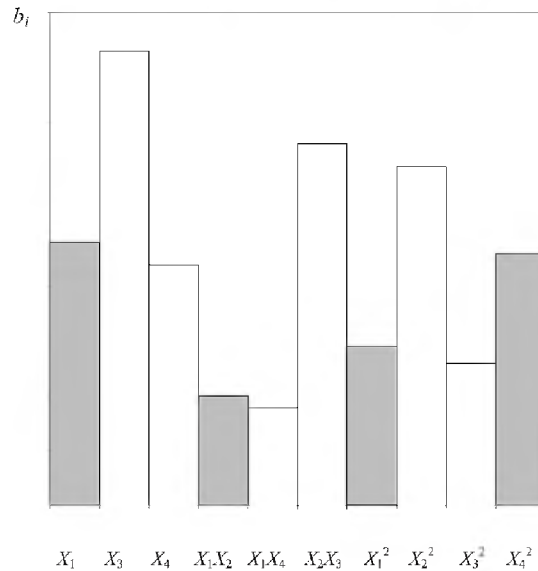


Рис. 5. Относительная степень влияния входных факторов на КИМ.

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  $\sigma_k$  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  $\sigma_k$  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  $\sigma_k$  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  $\sigma_k$  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  $\sigma_k$  и КИМ находится внутри изолиний  $Y_1 = 215 \text{ МПа}$  и  $Y_2 = 80\%$ .

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

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

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.

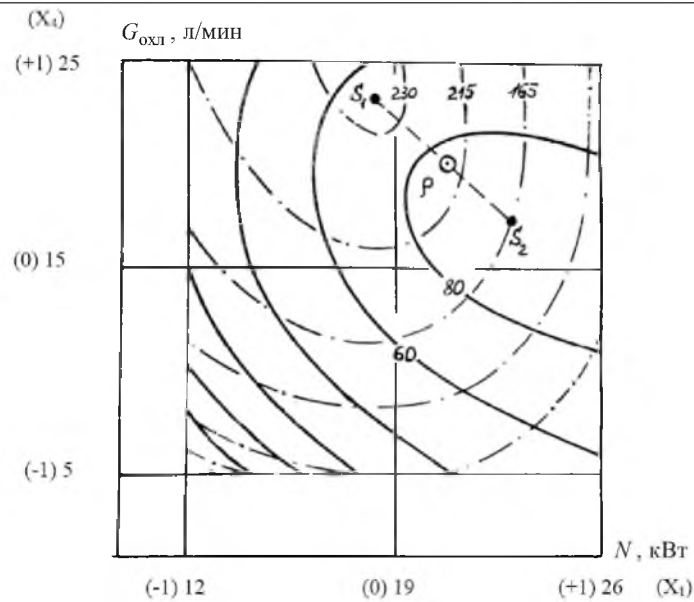


Рис. 6. Зависимости когезионной прочности  $\sigma_k$  и КИМ от значений мощности плазматрона ( $X_1$ ) и расхода охлаждающего воздуха ( $X_4$ ).

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 ( $\sigma_k$ ), так и по экономической характеристике (КИМ).

Для достижения одновременно наибольших показателей  $\sigma_k$  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  $\sigma_k$  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  $\sigma_k$  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 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-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 плазмотрона 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