

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Т о м I.
Р о к 1818.

*«Вестник Полоцкого государственного университета»
продолжает традиции первого в Беларуси литературно-
научного журнала «Месячник Полоцкий».*

ВЕСНИК ПОЛОЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА
Серыя В. Прамысловасць. Прыкладныя навукі

У серыі В навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаванне, змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне машынабудавання і машыназнаўства, матэрыялазнаўства і металургіі, хімічных тэхналогій і аховы працы.

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия В. Промышленность. Прикладные науки

В серии В научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области машиностроения и машиноведения, материаловедения и металлургии, химических технологий и охраны труда.

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY
Series B. Industry. Applied sciences

Series B includes reviewed articles which contain novelty in research and its results in mechanical engineering and machine science, material authority and metallurgy, applied chemistry and labor protection.

Адрес редакции:

Полоцкий государственный университет, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь
тел. + 375 (214) 53 34 58, e-mail: vestnik@psu.by

Отв. за выпуск *В.П. Иванов, Н.Н. Попок, А.А. Ермак.*
Редактор *Р.Н. Авласенок.*

Подписано к печати 27.02.2017. Бумага офсетная 70 г/м². Формат 60×84¹/₈. Ризография.
Усл. печ. л. 16,28. Уч.-изд. л. 19,62. Тираж 100 экз. Заказ

УДК 621.793.620.172

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО
НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ИХ СВОЙСТВА ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ***канд. техн. наук, доц. М.А. АГЕЕВ**(Херсонская государственная морская академия, Украина);**канд. техн. наук, доц. Т.В. ВИГЕРИНА**(Полоцкий государственный университет);**В.Я. НИКОЛАЙЧУК**(Винницкий национальный аграрный университет)**С.А. ДОВЖУК**(Кировоградский национальный технический университет, Украина);**С.Л. ЧИГРАЙ, А.В. ЛОПАТА**(Национальный технический университет «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев, Украина)*

На основе экспериментальных исследований и с использованием методов математического моделирования представлена комплексная оценка влияния дистанции газотермического напыления, толщины покрытия и условий их эксплуатации (давления и скорости скольжения) на прочность сцепления и интенсивность изнашивания покрытий. Многофакторный эксперимент с определенным варьированием технологических (дистанция напыления), конструкторских (толщина покрытий) и эксплуатационных (давление и скорость скольжения) факторов процесса газотермического напыления позволил оценить влияние каждого из них на свойства покрытий. Сделан вывод, что для повышения прочности сцепления газотермических покрытий и уменьшения интенсивности их изнашивания целесообразно комплексно использовать влияние технологических (дистанция напыления), конструкторских (толщина покрытий) и эксплуатационных (нагрузка и скорость скольжения) факторов процесса газотермического напыления.

Ключевые слова: газотермическое напыление, газотермические покрытия, прочность сцепления, эксплуатационные факторы, износостойкость.

Состояние и актуальность проблемы. Неаддитивное влияние на детали двигателей внутреннего сгорания (ДВС) эксплуатационных факторов представляет собой сложный процесс, который зависит от их величины. В связи с этим целесообразно исследовать материалы с покрытиями. С развитием технологий нанесения покрытий методами газотермического напыления (ГТН) и ввиду сложности физико-химических процессов, происходящих при ГТН, в настоящее время не существует аналитических зависимостей, которые позволили бы описать и всесторонне изучить этот процесс. Это приводит к тому, что эксперимент становится одним из основных средств получения информации о процессе.

Экспериментально-статистический метод - один из главных инструментов в технологических и конструкторских разработках. При отработке технологии ГТН-покрытий экспериментальные исследования проводят на образцах, так как непосредственное нанесение покрытий на детали и испытание их на реальных объектах - трудоемкий и дорогостоящий процесс. Разработка технологического процесса ГТН-покрытий связана с решением оптимизационных задач [1, 2]. Вопросы оптимизации занимают ключевое место [1, 2]. Это объясняется тем, что большое количество технологических параметров процесса ГТН в сочетании с обширной номенклатурой материалов, из которых формируют покрытие, предоставляют технологам широкий ряд альтернативных вариантов. В такой ситуации эффективность принимаемых решений зависит от выбора свойств покрытий, удобных для управления технологическим процессом ГТН, позволяющим увеличить ресурс двигателя при заданных условиях эксплуатации. Ресурс (интенсивность износа, срок службы) поверхностей деталей ДВС с ГТН-покрытиями зависит от их качественных характеристик, которые влияют на интенсивность срабатывания, твердость покрытия, его пористость, прочность сцепления, износостойкость. Исследования [3] работоспособности деталей с покрытиями показали, что основной причиной их разрушения является недостаточная связь между материалом покрытия и восстанавливаемой поверхностью. Другими словами, одной из наиболее важных эксплуатационных характеристик деталей с ГТН-покрытиями является прочность сцепления покрытия - критерий, который используют в практике создания деталей с покрытиями [4; 5]. Адгезионные и когезионные характеристики покрытия определяют его работоспособность [6]. При оптимизации режимов процесса ГТН в качестве основных факторов, определяющих качество деталей с покрытиями, были выбраны дистанция напыления (технологические факторы), толщина покрытия (конструкторские факторы), давление и скорость скольжения (эксплуатационные факторы).

Цель исследований - обеспечить максимальный срок службы деталей ДВС с ГТН-покрытиями путем оценки влияния параметров процесса ГТН на свойства покрытий и оптимизации режимов ГТН, которые позволяют при минимальных временных и финансовых затратах на экспериментальные исследования получить достаточный объем информации об изучаемом процессе.

Методология исследований. Принцип и предпосылки ее разработки. Методология научно-экспериментальных исследований предназначена для сокращения объема экспериментальных работ, получения максимальной информации и предполагает использование комплекса экспериментально-статистических и вычислительных методов исследований. Эти методы позволяют определить оптимальные технологические режимы ГТН, с помощью которых можно получить покрытие с заданными свойствами и обеспечить оптимальное соотношение прочностных характеристик в композиции «основа – покрытие», а именно максимальную прочность. То есть технологию нанесения покрытий ГТН следует рассматривать как способ управления свойствами поверхностного слоя. При этом конструирование материала типа «основа – покрытие» базируется не только на соотношении свойств покрытия с условиями эксплуатации, но и на соотношении свойств покрытия со свойствами основы.

В представляемой работе разработана общая методология, которая базируется на применении системного подхода к решению научной проблемы и математического моделирования процесса ГТН, с целью изучения особенностей процесса напыления, установления закономерностей влияния параметров ГТН на свойства и структуру получаемых покрытий, на выбор оптимальных режимов ГТН и разработку технологического процесса (ТП) нанесения ГТН-покрытий. основополагающим принципом и предпосылкой разработки методологии научно-экспериментальных исследований ГТН-покрытий являются системность и комплексный характер исследования их свойств, принципы моделирования (содержательный анализ, формализованное описание, исследование и выбор оптимального варианта). Исходя из системного подхода организация исследования представляет собой иерархическую структуру таких методологических уровней:

- *проблемный анализ* – предполагает выяснение сущности и актуальности проблемы, определение цели исследования и постановку задач;
- *концептуальный уровень* – включает анализ системного окружения, выделение из него ТП;
- *операционный уровень* – предполагает проведение функционально-морфологического анализа, выбор режимов ТП и разработку его математических моделей;
- *детальный уровень* – включает выбор оптимальных вариантов ТП;
- *завершающий этап* – принятие решения по выбору оптимальных параметров ТП, которые позволяют решить научную проблему.

Математическое описание и разработка математических моделей технологического процесса нанесения газотермических покрытий. Для эффективного анализа механизма явлений и управления технологическим процессом ГТН-покрытий (объектом исследования) необходимо выявить взаимосвязь факторов, определяющих ход процесса, и представить их в количественной форме – в виде математической модели. Модель позволяет получить информацию о процессе, который протекает в объекте, рассчитать характеристики объекта. Реальный технологический процесс ГТН сложен, а явления, его сопровождающие, разнообразны, поэтому математической моделью объекта исследования может быть совокупность соотношений вида:

$$Y = f(X_i, V_j, Z_k), \quad (1)$$

где X_i – совокупность значений входных параметров, контролируемых и управляемых; V_j – совокупность значений контролируемых, но не управляемых, параметров; Z_k – совокупность параметров, не управляемых и не контролируемых.

Однако практически при построении модели соотношения (2) получить невозможно [7]. Поэтому необходимо вводить ограничения, то есть каждый из параметров может меняться в определенных пределах, обусловленных нижней и верхней границами:

$$X_{iH} \leq X_i \leq X_{iB}, \quad V_{jH} \leq V_j \leq V_{jB}, \quad Z_{kH} \leq Z_k \leq Z_{kB}. \quad (2)$$

Задача исследований заключается в том, чтобы при фиксированных параметрах выбрать такую рабочую точку в области работоспособности, при которой выходной параметр (или параметр оптимизации) объекта Y достигает оптимальной величины. Иными словами, необходимо оптимизировать функцию

$$Y = f_{opt}(X_i = \text{var}; V_j = \text{const}; Z_k = \text{const}) \text{ при } X_{iH} \leq X_i \leq X_{iB}. \quad (3)$$

Математическая модель объекта есть функция отклика, которая связывает параметр оптимизации Y , характеризующий результаты эксперимента, с переменными параметрами, которыми варьируют:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k). \quad (4)$$

Независимые переменные X_i принято называть факторами, координатное пространство с координатами $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$ – факторным пространством, а геометрическое изображение функции отклика в факторном пространстве – поверхностью отклика. При недостаточных знаниях о механизме технологического процесса представим функцию отклика следующим полиномом [9]:

$$Y^* = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i<j<l}^k b_{ijl} x_i x_j x_l, \quad (5)$$

где Y^* – расчетное значение параметра оптимизации; b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} – выборочные коэффициенты, которые можно получить методами регрессионного анализа, используя результаты эксперимента.

Построение математической модели является необходимым элементом экспериментального исследования. Решение задачи по построению математической модели ТП нанесения ГТН-покрытий проводилось по следующим этапам: формализация задачи, конструирование плана эксперимента, проведение эксперимента, предварительный статистический анализ результатов эксперимента, построение математических моделей по результатам эксперимента, анализ качества полученной модели, проведение расчетного эксперимента с использованием построенных моделей, формирование выводов и рекомендаций. Указанные действия являются ТП получения и обработки информации при решении задач моделирования и оптимизации. Когда цель исследования состоит в одновременном получении математической модели и поиске оптимальных условий, сначала строится модель, а затем проводится поиск оптимальных условий. После проведения формализации выполняется конструирование плана эксперимента, от которого зависит объем информации, ее качество и надежность. Конструирование плана эксперимента проводили с помощью пакета прикладных программ «Планирование, регрессия и анализ моделей (ППП ПРИАМ)» [8–10]. В пакете реализована специально разработанная адаптивная процедура определения структуры, которая является частью технологии и имеет высокую эффективность [11–12].

Выбор и обоснование критериев оптимизации ГТН-покрытий и управляемых факторов. Использование технологии ГТН-покрытий основано на возможности управления этим процессом с целью обеспечения максимальной прочности и ресурса деталей ДВС при их минимальной стоимости. Фазовый состав, структура, механические и эксплуатационные свойства поверхностей с покрытиями есть функции параметров процесса их нанесения.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что поверхность с покрытиями обладает требуемыми свойствами при заданных параметрах ГТН. Одна из важнейших характеристик ТП получения деталей с ГТН-покрытиями – воспроизведение и стабильность их свойств. Эта характеристика определяется количеством параметров ГТН как управляемых, так и неуправляемых, которые влияют на срок службы деталей и ресурс двигателей. Процесс ГТН характеризуется большим числом факторов, оказывающих влияние на свойства поверхностей с покрытиями, управляя которыми можно повысить срок их службы. На условия формирования ГТН-покрытий неаддитивно влияют конструктивные особенности оборудования для ГТН, параметры процесса напыления, характеристики материала покрытия [4]. Технологические параметры процесса ГТН должны обеспечивать заданные свойства поверхностей и работоспособность деталей ДВС. Для определения оптимальных режимов процесса ГТН-покрытий исследовалось влияние параметров ГТН на свойства покрытий, таких как прочность сцепления и износостойкость (табл. 1–4).

Таблица 1. – Зависимость прочности сцепления на срез и износостойкости от дистанции напыления

№ эксперимента	Дистанция напыления, L, мм	Прочность сцепления на срез, $\sigma_{сц}$, МПа	Интенсивность изнашивания, $J_{и}$, мкм/км (10^{-9})	№ эксперимента	Дистанция напыления, L, мм	Прочность сцепления на срез, $\sigma_{сц}$, МПа	Интенсивность изнашивания, $J_{и}$, мкм/км (10^{-9})
1	140	90	0,013	5	120	88	0,012
2	100	110	0,012	6	160	80	0,014
3	180	71	0,014	7	80	119	0,015
4	200	60	0,015	8	160	72	0,013

Таблица 2. – Зависимость прочности сцепления на срез и износостойкости от толщины покрытия

№ эксперимента	Толщина покрытия, h, мм	Прочность сцепления на срез, $\sigma_{сц}$, МПа	Интенсивность изнашивания, $J_{и}$, мкм/км (10^{-9})	№ эксперимента	Толщина покрытия, h, мм	Прочность сцепления на срез, $\sigma_{сц}$, МПа	Интенсивность изнашивания, $J_{и}$, мкм/км (10^{-9})
1	1,5	109	0,011	5	0,5	86	0,012
2	2,5	108	0,012	6	1,5	115	0,011
3	1	110	0,014	7	3	89	0,015
4	2	120	0,013	8	3	95	0,013

Таблица 3. – Зависимость износостойкости от нагрузки на образец

№ эксперимента	Толщина покрытия, h, мм	Прочность сцепления на срез, $\sigma_{сц}$, МПа	Интенсивность изнашивания, $J_{и}$, мкм/км (10^{-9})	№ эксперимента	Толщина покрытия, h, мм	Прочность сцепления на срез, $\sigma_{сц}$, МПа	Интенсивность изнашивания, $J_{и}$, мкм/км (10^{-9})
1	6	85	0,012	5	2	120	0,012
2	4	110	0,012	6	10	80	0,014
3	8	90	0,014	7	4	110	0,011
4	8	90	0,013	8	2	120	0,011

Таблица 4. – Зависимость износостойкости от скорости скольжения

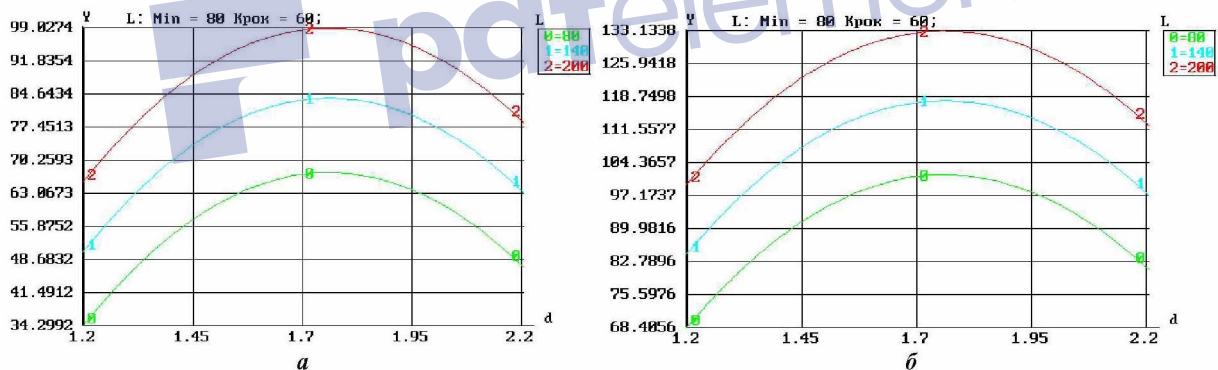
№ эксперимента	Толщина покрытия, h, мм	Прочность сцепления на срез, $\sigma_{сц}$, МПа	Интенсивность изнашивания, J_h , мкм/км (10^{-9})	№ эксперимента	Толщина покрытия, h, мм	Прочность сцепления на срез, $\sigma_{сц}$, МПа	Интенсивность изнашивания, J_h , мкм/км (10^{-9})
1	2,3	100	0,012	5	2,45	90	0,012
2	2,6	110	0,013	6	2,75	120	0,015
3	2,15	85	0,014	7	2,3	100	0,011
4	2	80	0,014	8	2	80	0,015

Математическое моделирование процесса газотермического напыления покрытий. Для моделирования процесса ГТН-покрытий на основе анализа проведенного ранжирования определена группа факторов, которые в большей степени влияют на величину критериев оптимизации, установлены уровни их варьирования. В результате экспериментальных исследований процесса ГТН-покрытий выбраны следующие факторы: конструкторские (толщина покрытия); технологические (дистанция напыления); эксплуатационные (нагрузка, скорость скольжения). Параметрами оптимизации являлись: интенсивность изнашивания J_h и прочность сцепления $\sigma_{сц}$. По результатам эксперимента проведен статистический анализ и построены регрессионные модели зависимостей критериев оптимизации, характеризующих прочность сцепления и износостойкость ГТН-покрытий, от конструкторских, технологических и эксплуатационных факторов. По результатам исследований построена математическая модель (6) зависимости критерия оптимизации, который характеризует прочность сцепления покрытий, от параметров ГТН (см. табл. 1–2); расчет моделей осуществлялся с помощью ППП ПРИАМ.

$$Y_{сц} = 94,5537 - 16,1578x_1 + 8,66664x_2 - 4,37462x_3 - 17,2747x_4 - 3,92423 x_1x_2 - 16,0642 x_1x_3 - 17,0532x_2x_3 - 22,4759x_1x_4 - 9,99573x_2x_4 + 1,41499x_3x_4, \quad (6)$$

где $Y_{сц}$ – математическая модель в кодированных значениях для прочности сцепления покрытия.

Используя графический метод исследования влияния факторов на параметр оптимизации, характеризующий прочность сцепления покрытия, получены результаты, на основе которых выполнялось построение семейства графиков частных уравнений регрессии (рис. 1).



уровень а: $h = 1,5$; $L = 180$; $P = 2$; уровень б: $V = 2$; $h = 0,5$; $L = 200$; $P = 2$; $V = 2$

Рисунок 1. – Графики частных уравнений регрессии $Y_{сц} = f(X_1, X_2)$, факторы зафиксированы на разных уровнях

Анализ графиков позволяет рассмотреть влияние факторов на значение функции отклика и определить те их значения, которые обеспечат больший или меньший эффект. Полученные результаты дают наглядное представление о геометрическом образе функции отклика (рис. 2).

Результаты статистического анализа позволяют сделать вывод, что математическая модель (6) зависимости прочности сцепления покрытий от параметров ГТН адекватна и информативна, результаты воспроизведены. Таким образом, делаем вывод, что математическая модель (6) адекватно описывает процесс газотермического напыления покрытий и ее можно использовать для анализа и выбора оптимальных параметров этого процесса.

По результатам эксперимента проведен статистический анализ и построена математическая модель (7) зависимости критерия оптимизации, характеризующей износостойкость покрытий от параметров ГТН. Расчет модели осуществлялся с помощью ППП ПРИАМ. В качестве исходных данных использованы результаты исследований, проведенных при одних и тех же условиях (см. табл. 2).

$$Y_{Jh} = 0,013375 + 0,00153333x_3, \quad (7)$$

где Y_{Jh} – математическая модель в кодированных значениях для износостойкости покрытия.

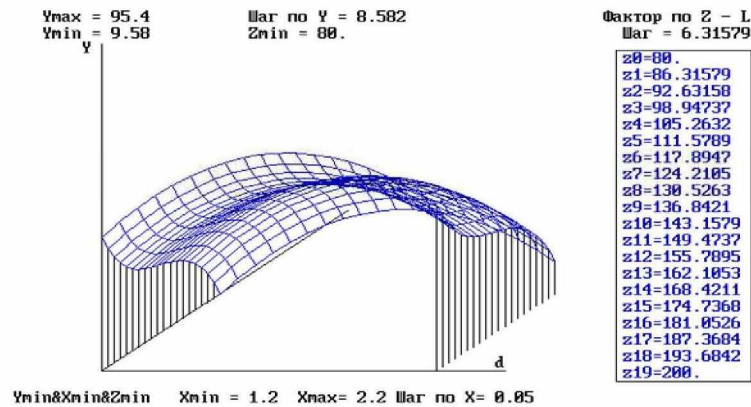


Рисунок 2. – График исследования поверхности отклика $Y_{\text{сцц}} = f(X_1, X_2)$ в трехмерном пространстве

Математическая модель (7) зависимости критерия оптимизации, который характеризует износостойкость покрытий от параметров ГТН (табл. 3), адекватна и информативна, результаты воспроизведены. Это говорит о том, что математическая модель (7) адекватно описывает процесс ГТН и ее можно использовать для анализа и выбора его оптимальных параметров. Уравнение регрессии (7), описывающее зависимость износостойкости J_h от параметров ГТН, представлено графически на рисунке 3.

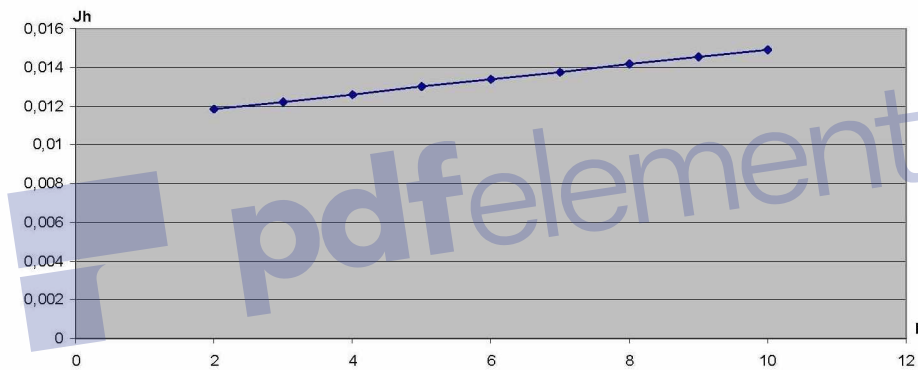


Рисунок 3. – График частных уравнений регрессии $Y_{\text{жн}} = f(X_3, X_4)$

Анализ уравнений (6) и (7) свидетельствует о том, что прочность сцепления покрытий, полученных методом ГТН, зависит от их толщины и дистанции напыления. На износостойкость покрытий влияют условия их эксплуатации (нагрузка и скорость скольжения).

Обобщая результаты исследований влияния факторов процесса ГТН-покрытий из композиционного порошка КХН-30 (70% карбид хрома Cr_3C_2 и 30% нихром (Ni-Cr 80/20)), установлены следующие технологические параметры процесса: давление кислорода $P_{\text{O}_2} = 0,15 \dots 0,5$ МПа, давление горючего газа $P_{\text{Г}} = 0,03 \dots 0,05$ МПа, давление воздуха $P_{\text{воз.тр}} = 0,1 \dots 0,2$ МПа; расход кислорода $G_{\text{Г}} = 0,5 \dots 2,5$ м³/ч; расход горючего газа $0,3 \dots 0,6$ м³/ч; расход воздуха $3,0 \dots 5,0$ м³/ч (воздух использовали как транспортирующий газ); соотношение кислорода к горючему газу: для ацетиленокислородной смеси $\beta = V_{\text{O}_2} / V_{\text{C}_2\text{H}_2} = 1,1 \dots 1,4$; пропан-кислородной смеси $\beta = V_{\text{O}_2} / V_{\text{C}_3\text{H}_8} = 3,5 \dots 4,0$; дистанция напыления $100 \dots 200$ мм. Метод подготовки поверхности перед напылением – дробеструйная обработка. Характеристики ГТН-покрытий из композиционного порошка КХН-30 (70% карбид хрома Cr_3C_2 и 30% нихром (Ni-Cr 80/20)) приведены в таблице 5.

Таблица 5. – Характеристики ГТН-покрытий из композиционного порошка КХН-30

Характеристика покрытия	Значения
Прочность сцепления на срез, $\sigma_{\text{сцц}}$, МПа	80... 120 МПа
Интенсивность изнашивания, J_h , мкм/км (10^{-9})	0,011... 0,015
Микротвердость, МПа	40... 43 HRC
Контактные нагрузки, МПа	До 100 МПа при наличии ударов
Толщина покрытия	0,5... 10,0 мм

Заключение. На основе полученных экспериментальных данных разработаны модели, связывающие прочность сцепления и интенсивность изнашивания покрытий с их толщиной, дистанцией напыления и условиями эксплуатации. Решение задач математического моделирования и оптимизации процесса нанесения покрытий ГТН позволило получить комплексную оценку влияния входных (оптимизирующих) переменных на выходные показатели – свойства покрытий. Анализируя полученные модели (6), (7), следует отметить, что прочность сцепления ГТН-покрытий зависит от их толщины и дистанции напыления. На износостойкость покрытий на срез влияют условия его эксплуатации (нагрузка и скорость скольжения). Установленные режимы процесса нанесения покрытий методом ГТН позволяют наносить на функциональные поверхности деталей ДВС покрытия из композиционного порошка КХН-30 с прочностью сцепления 80...120 МПа, которая в 2...3 раза превышает аналоги (40...60 МПа), пористостью менее 10% и микротвердостью, определяемой твердостью напыляемого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полянский, А.С. Методика оптимизации количества запасных частей быстроизнашиваемых деталей двигателей / А.С. Полянский, Е.А. Дубинин // Вісник ХДТУСГ. Підвищення надійності відновлюємих деталей машин : зб. наук. праць. – Харків, 2003. – Вип. 15. – С. 50–54.
2. Вислоух, С.П. Многокритериальная оптимизация в технологических расчетах / С.П. Вислоух // Високі технології в машинобудуванні : зб. наук. праць НТУ «ХП». – Харьков, 2001. – С. 94–98.
3. Прочность материалов и элементов конструкции в экстремальных условиях / под ред. Г.С. Писаренко. – К. : Наук. думка, 1980. – Т. 2. – 767 с.
4. Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А.Ф. Ильюшенко [и др.]. – Минск : Беспринт, 2002. – 480 с.
5. Медведева, Н.А. Повышение прочности сцепления и снижение пористости напыленных покрытий из порошковых материалов электроконтактным припеканием : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.03.06 / Н.А. Медведева ; Кировоград. нац. техн. ун-т. – Кировоград, 2006.
6. Ляшенко, Б.А. О критериях адгезивно-когезионной равнопрочности и термостойкости защитных покрытий / Б.А. Ляшенко // Проблемы прочности. – 1980. – № 10. – С. 114.
7. Радченко, С.Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении / С.Г. Радченко. – К. : ЗАО «Укрспецмонтажпроект», 1998. – 274 с.
8. Радченко, С.Г. Методология создания новой техники и технологий / С.Г. Радченко, С.Н. Лапач // Технологические системы. – 2003. – № 1. – С. 41–44.
9. Радченко, С.Г. Математическое моделирование и оптимизация технологических систем : учеб. пособие. – К. : ИВЦ «Политехника», 2001. – 88 с.
10. Большев, Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – 3-е изд. – М. : Наука, 1983. – 416 с.
11. Лапач, С.Н. Пакет прикладных программ ПРИАМ / С.Н. Лапач, С.Г. Радченко, Н.И. Литвинчук // Информационный листок о науч.-техн. достижении. – № 88-007. – К. : УкрНИИТИ, 1988. – 4 с.
12. Каталог. Программные продукты Украины. Планирование, регрессия и анализ модели ПРИАМ / НТУ КПИ ; под ред. С.Н. Лапач, С.Г. Радченко, П.Н. Бабич. – К. : СП «Текпор», 1993. – С. 24–27.

Поступила 07.02.2017