

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

УДК 621.795.4

КРАВЧЕНКО ИГОРЬ НИКОЛАЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор¹

E-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

ГЛИНСКИЙ МАКСИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ¹

E-mail: maximagl@yandex.ru

КОЛОМЕЙЧЕНКО АНАСТАСИЯ АЛЕКСАНДРОВНА¹

E-mail: kolom.anastasiya@gmail.com

ПУЗРЯКОВ АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент²

E-mail: giperon@rambler.ru

ШАМАРИН ЮРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент²

E-mail: shamarina@mgul.ac.ru

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Российская Федерация

² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ПОВЫШЕННОЙ ТОЛЩИНЫ ПУТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Для выбора параметров и оптимизации режимов при плазменном напылении (скорости перемещения плазмотрона, расхода напыляемого материала и др.) с целью минимизации уровня остаточных напряжений экспериментально определены зависимости пористости, коэффициентов использования материала и формообразования покрытий от среднemasсовой температуры частиц напыляемого материала. При этом рациональные режимы напыления (ток, расход и состав плазмообразующего газа), влияющие на термодинамические свойства плазменной струи и напыляемых частиц, устанавливали исходя из необходимости получения максимума прочности сцепления или заданной пористости покрытия. В свою очередь, скорость перемещения плазмотрона и расход напыляемого материала оптимизировали по критерию минимума остаточных напряжений. Математическая модель, на основе которой строится оптимизационная задача, связана с током, расходом и составом плазмообразующего газа через среднemasсовую температуру напыляемых частиц, оказывающую значительное влияние на величину теплового потока. Разработанная численная математическая модель упругопластического состояния системы «покрытие-металлическая основа» позволяет установить, что при изменении расхода напыляемого материала от 0,1 до 1,0 г/с и скорости перемещения плазмотрона от 10 до 350 мм/с остаточные напряжения в покрытиях из вольфрама, оксида алюминия и порошка ПГ-19М-01 на сталь изменяют свой знак и могут быть как сжимающими, так и растягивающими. Установлено, что в покрытиях из оксида алюминия на алюминиевой основе формируются остаточные напряжения сжатия, а в вольфрамовом покрытии при незначительном тепловом воздействии – растягивающие напряжения. Варьирование режимами позволяет снизить уровень остаточных напряжений при достижении минимума в 3...5 раз. В работе показано, что возможные напряженные состояния, испытываемые системой «покрытие-металлическая основа» под действием внешних нагрузок без потери работоспособности, представляют собой область, ограниченную критериями адгезионной и когезионной прочности покрытия и критерием текучести основы.

Ключевые слова: покрытие, металлическая основа, система, модель, остаточные напряжения.

Введение. При моделировании процессов плазменного напыления достаточно сложно установить теоретическую зависимость свойств покрытий с параметрами напыляемых частиц. При нанесении покрытий температуру подложки стремятся поддерживать постоянной, так как в противном случае необходима корректировка режимов по мере нагрева подложки. Так, согласно данным [1-3], влияние скорости частиц в пределах 40...100 м/с на прочность их сцепления с подложкой незначительно. В работе [4] отмечается доминирующее влияние температуры частиц по сравнению с их скоростью на пористость покрытий. Поэтому связь свойств покрытий с режимами напыления необходимо устанавливать через температуру частиц.

Известные аналитические соотношения прочности сцепления отдельных частиц с подложкой в зависимости от их скорости и температуры не позволяют с достаточной точностью определить прочность сцепления всего покрытия с основой. Однако эти соотношения могут указать область термодинамических режимов, обеспечивающих максимум прочности сцепления покрытия с основой. В практике напыления накоплен большой объем экспериментальных данных поиска оптимальных режимов нанесения различных материалов, полученных методами планирования экспериментов [5]. Соответствующая данным режимам среднемаховая температура частиц, необходимая для оптимизации режимов напыления (расхода напыляемого материала и скорости перемещения плазмотрона), может быть получена с помощью расчетных моделей.

Цель работы – разработка численной математической модели упругопластического состояния

системы «покрытие-металлическая основа» при использовании плазменных процессов.

Материал и методика исследования. Для нанесения покрытий использовали плазмотрон РПД-03 (конструкция МГТУ им. Н.Э. Баумана). Дистанция напыления составляла 100 мм. Покрытия наносились из порошков ПЦП-100, оксида алюминия и никрома грануляцией 50...63 и 63...100 мкм. Пористость измеряли методом гидростатического взвешивания. Экспериментальные данные пористости покрытий (P , %) и коэффициентов использования материала (КИМ) от среднемаховой температуры напыляемых частиц (T_c) приведены в таблицах 1-3.

В качестве постоянных параметров при моделировании процесса и поиске оптимальных режимов напыления, обеспечивающих минимум остаточных напряжений в покрытии, использовали среднемаховую температуру частиц, пористость покрытия и КИМ. В качестве переменных параметров модели принимали расход напыляемого материала (G) и скорость перемещения плазмотрона (V) относительно напыляемой поверхности, от которых зависит толщина напыляемого слоя и соответственно величина теплового потока в подложку, определяющих тепловое поле и напряженное состояние покрытия и металлической основы. При моделировании процесса режимы напыления (электрический ток, расход и состав плазмообразующего газа) являются неизменными параметрами и определяются экспериментально [6], исходя из необходимости получения пористости или максимальной прочности покрытия с основой.

Таблица 1

Зависимость пористости покрытия из Al_2O_3 и КИМ от среднемаховой температуры напыляемых частиц

№ п/п	Сила тока, I , А	Расход материала, G , г/с	Концентрация азота в струе, C , %	Диаметр частиц, D_c , мкм	Коэффициент использования материала (КИМ), %	Пористость покрытия, P , %	Плотность покрытия, ρ , г/см ³	Среднемаховая температура частиц, T_c , К
1	225	0,83	0	63...190	40,0	17,53	2,994	2036
2	255	0,83	0	63...190	19,0	14,77	3,109	2229
3	225	0,65	0	63...190	21,0	14,38	3,100	1848
4	225	0,83	0	63...190	18,0	14,61	3,053	1940
5	255	0,83	0	63...190	18,0	14,18	3,122	2410
6	200	0,83	0	63...190	8,0	18,73	3,033	1629
7	225	0,65	0	63...190	20,0	12,57	3,185	2124
8	225	0,90	0	63...190	10,0	18,33	3,009	1774
9	225	0,83	0	63...190	16,0	14,61	3,038	1940
10	225	0,83	0	63...190	16,0	14,00	3,040	1940

Таблица 2

Зависимость пористости покрытия из NiCr и КИМ от среднemasовой температуры напыляемых частиц

№ п/п	Сила тока, I, А	Расход материала, G, г/с	Концентрация азота в струе, C, %	Диаметр частиц, D _ч , мкм	Коэффициент использования материала (КИМ), %	Пористость покрытия, П, %	Плотность покрытия, ρ, г/см ³	Среднemasовая температура частиц, T _ч , К
1 2 3	457	1,0	0	70...80	35,0 30,0 39,0	19,50 — 17,83	6,46 — 6,61	1940
4 5 6	345	1,14	0	70...80	30,0 31,0 32,0	17,83 21,13 20,92	6,67 6,49 6,47	1450
7 8	345	1,14	9	70...80	64,0 62,0	— 11,06	— 6,91	1800
9 10	330	1,0	0	70...80	55,0 29,0	— 26,28	— 6,052	1200
11 12	405	1,11	9	70...80	64,0 67,0	17,45 13,72	6,60 6,82	1940
13 14 15	300	1,15	13	90...100	65,0 67,0 68,6	12,20 15,32 13,02	6,92 6,65 6,83	1700
16 17 18	405	1,1	9	90...100	68,6 68,5 70,6	14,00 17,49 14,35	6,71 6,49 6,49	1750
19 20	400	1,15	13	90...100	67,6 72,5	11,30 14,12	6,72 6,63	1900
21 22 23	500	1,1	9	90...100	64,0 65,0 70,0	12,30 8,13 13,71	6,24 7,25 6,33	1940
24	335	1,0	0	90...100	23,5	26,06	5,84	1200
25	405	1,15	13	90...100	63,0	11,07	7,095	1750
26 27	405	1,1	9	125...140	52,0 49,0	20,25 16,25	6,11 6,72	1315
28 29 30	405	0,8	9	125...140	63,0 52,0 61,0	14,97 13,73 15,39	6,69 6,82 6,67	1550

Таблица 3

Зависимость пористости покрытия из W и КИМ от среднemasовой температуры напыляемых частиц T_ч

№ п/п	Сила тока, I, А	Расход материала, G, г/с	Концентрация азота в струе, C, %	Диаметр частиц, D _ч , мкм	Коэффициент использования материала, КИМ, %	Пористость покрытия, П, %	Плотность покрытия, ρ, г/см ³	Среднemasовая температура частиц, T _ч , К
1	400	1,3	20	63...100	36,0	14,59	15,60	2923
2	400	1,3	20	63...100	58,0	13,01	15,59	2923
3	400	1,0	10	63...100	44,0	17,15	15,52	2938
4	400	1,0	10	63...100	52,0	13,72	15,69	2938
5	400	0,7	20	63...100	65,0	16,63	15,14	3400
6	400	0,7	20	63...100	73,0	15,41	15,39	3500
7	400	1,0	30	63...100	55,0	13,44	15,48	3600
8	400	1,0	30	63...100	61,0	12,83	15,41	3600

На основании известных значений электрического тока, расхода и состава газа определяли численно среднemasсовую температуру напыляемых частиц и экспериментально коэффициент формообразования покрытия k . При этом шаг напыления S является зависимым параметром, который рассчитывали исходя из заданной толщины наносимого слоя покрытия по текущим значениям расхода напыляемого материала и скорости перемещения плазмотрона.

Результаты и обсуждение. Результаты расчета средних значений остаточных напряжений ($\bar{\sigma}_o$) в покрытиях из различных материалов в зависимости от их расхода и скорости перемещения плазмотрона показали следующее:

1. При напылении оксида алюминия на сталь (табл. 1) в покрытии формируются только остаточные напряжения сжатия на границе с основой. Минимальные значения средних остаточных напряжений в покрытиях ориентированы вдоль линии шага напыления.

2. При напылении вольфрама и порошка ПГ-19М-01 на сталь (табл. 3) весь диапазон изменения параметров разделяется на две области, одна из которых обеспечивает сжимающие остаточные напряжения, а другая – растягивающие.

При незначительном тепловом воздействии на алюминиевую основу, а также минимальном расходе напыляемого материала и максимальной скорости перемещения плазмотрона в вольфрамовом покрытии формируются растягивающие напряжения. При повышении теплового воздействия на основу в результате увеличения расхода напыляемого материала или уменьшения скорости перемещения плазмотрона растягивающие остаточные напряжения переходят в сжимающие.

Изменение расхода напыляемого материала и скорости перемещения плазмотрона значительно влияет на уровень среднего напряженного состояния в покрытии.

Таким образом, имеется оптимальный шаг напыления, обеспечивающий минимальные значения остаточных напряжений для любых сочетаний параметров расхода материала и скорости перемещения плазмотрона.

Для оценки влияния режимов напыления (расхода материала и скорости перемещения плазмотрона) в качестве критериев примем остаточные напряжения в покрытии на границе с металлической основой и среднее напряженное состояние в покрытии ($\bar{\sigma}_o$), вычисленное как отношение суммы действующих в сечении покрытия остаточных напряжений (σ_{oi}), к площади этого сечения (S):

$$\bar{\sigma}_o = \frac{\sum_{i=1}^N (|\sigma_{oi}| \cdot S_i)}{S} \quad (1)$$

Для того чтобы учесть действительный уровень напряженного состояния покрытия, необходимо

избежать при суммировании взаимоисключения напряжений с разными знаками. Поэтому в формуле (1) напряжения при суммировании σ_{oi} взяты по модулю.

В качестве параметра оптимизации принята средняя величина действующих в системе «покрытие-металлическая основа» остаточных напряжений, определяемых по формуле (1). Целевая функция будет иметь вид

$$\bar{\sigma}_o = (G, V) = \min. \quad (2)$$

Задачу минимизации уровня остаточных напряжений в покрытии решаем методом, основанным на том, что направление наискорейшего спуска соответствует направлению наибольшего убывания целевой функции. Согласно данным [7], в начальной точке, выбираемой произвольно, определяется направление спуска, противоположного градиенту функции:

$$\text{grad} \bar{\sigma}_o = \left\{ \frac{\partial \bar{\sigma}_o}{\partial G}; \frac{\partial \bar{\sigma}_o}{\partial V} \right\}. \quad (3)$$

Частные производные при определении градиента вычислялись с помощью численного дифференцирования:

$$\frac{\partial \bar{\sigma}_o}{\partial G} = \frac{1}{\Delta G} [\bar{\sigma}_o(G + \Delta G, V) - \bar{\sigma}_o(G, V)]; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{\sigma}_o}{\partial V} = \frac{1}{\Delta V} [\bar{\sigma}_o(G, V + \Delta V) - \bar{\sigma}_o(G, V)].$$

В выбранном направлении двигаются до тех пор, пока целевая функция убывает, достигая при этом минимума в некоторой точке. В этой точке снова определяется направление спуска (с помощью градиента) и находится новая точка минимума целевой функции. Поиск минимума продолжается до тех пор, пока разница между значениями целевой функции на текущем и предыдущем шагах не будет меньше заданной величины:

$$|\bar{\sigma}_{oi} - \bar{\sigma}_{oi-1}| < \varepsilon. \quad (5)$$

где $\bar{\sigma}_{oi}$, $\bar{\sigma}_{oi-1}$ – значения целевой функции на текущем и предыдущем шагах минимизации; ε – заданная точность вычислений.

Метод наискорейшего спуска сводит многомерную задачу к последовательности одномерных задач на каждом шаге оптимизации.

В качестве метода одномерной минимизации использовали метод золотого сечения, который состоит в последовательном построении отрезков, стягивающихся к точке минимума целевой функции.

На рисунке 1 представлена блок-схема многомерной минимизации методом наискорейшего градиентного спуска.

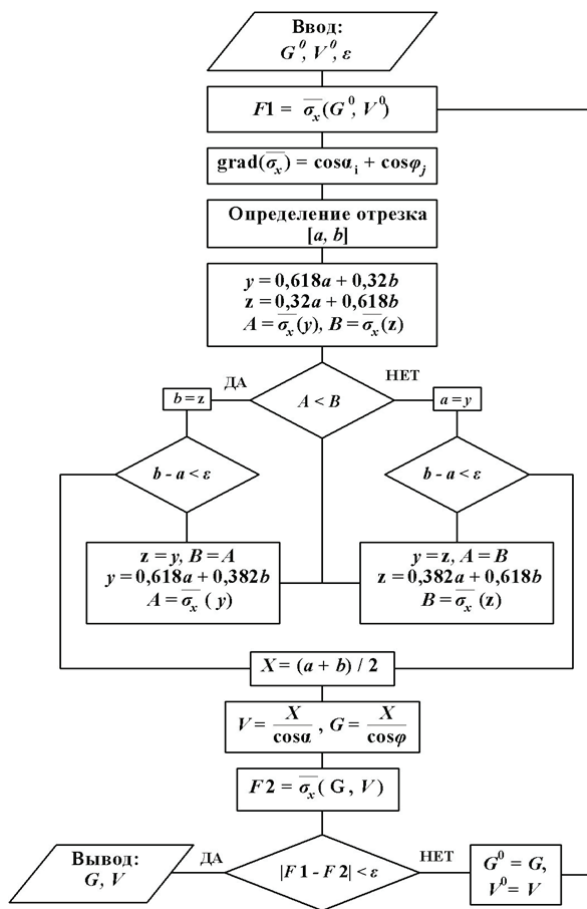


Рис. 1. Блок-схема алгоритма многомерной минимизации методом наискорейшего градиентного спуска

На каждом шаге одномерной минимизации, за исключением первого, вычисление значений целевой функции производится лишь один раз. Полученная при этом точка, называемая золотым сечением, выбирается так, чтобы отношение длины большого отрезка к длине всего интервала оптимизируемого параметра равнялась отношению длины меньшего отрезка к длине большого отрезка. Таким образом, на первом шаге процесса одномерной минимизации внутри интервала $[a, b]$ выбираем две внутренние точки $X1$ и $X2$, делящие интервал в пропорции золотого сечения:

$$\begin{cases} X1 - a = b - X2 = (b - a)(1 - k); \\ b - X1 = X2 - a = (b - a)k. \end{cases} \quad (6)$$

Далее вычисляются значения целевой функции $X1$ и $\bar{\sigma}_o(X2)$. Допустим, что $\bar{\sigma}_o(X1) < \bar{\sigma}_o(X2)$, тогда минимум расположен на одном из прилегающих к $X1$ отрезков $[a, X1]$ или $[X1, X2]$. Поэтому отрезок $[X2, b]$ можно отбросить, сузив при этом первоначальный интервал. Второй шаг проводится уже на отрезке $[a, X2]$ с повторением про-

цедуры сужения интервала. Процесс одномерной оптимизации повторяется до тех пор, пока длина очередного отрезка не станет меньше заданной величины.

На выходе оптимизационной задачи имеем расход напыляемого материала (G), скорость перемещения плазмотрона (V) относительно поверхности изделия и шаг напыления (S), обеспечивающие минимум остаточных напряжений в системе «покрытие-металлическая основа». Алгоритм определения параметров процесса плазменного нанесения многослойных покрытий повышенной толщины представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Алгоритм определения параметров процесса плазменного нанесения многослойных покрытий повышенной толщины

На основании предложенной оптимизационной модели разработан программный комплекс [8], позволяющий определять оптимальные режимы и параметры нанесения покрытий повышенной толщины и заданной пористости на основе многомерной минимизации.

На рисунке 3 представлено влияние толщины покрытия на режимы напыления при нанесении вольфрама на сталь. Заметим, что с увеличением толщины слоя покрытия оптимальные режимы стремятся к значениям, соответствующим напылению вольфрама на вольфрам.

При напылении покрытия большой толщины нанесение очередного слоя приводит к возникновению напряженного состояния, которое уравнивается в верхних слоях покрытия большой толщины и не приводит к увеличению напряженного состояния на границе между покрытием и металлической основой. Это обеспечит возможность нанесения покрытия с большим расходом напыляемого материала, а значит – и с большей производительностью.

С целью проверки эффективности разработанной модели проведен расчет оптимальных режимов нанесения покрытия из оксида алюминия на сталь. При этом получены следующие режимы: $V = 250$ мм/с, $G = 0,4$ г/с.

На рисунке 4 представлены результаты численного расчета остаточных напряжений на гра-

нице со стальной основой (линия 1) и среднего напряженного состояния в покрытии (линия 2) в зависимости от расхода напыляемого материала (G) и скорости перемещения плазматрона (V).

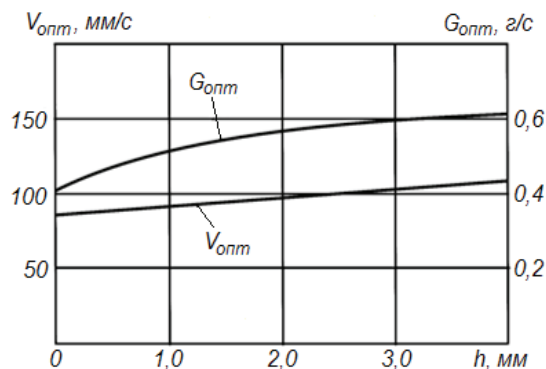


Рис. 3. Зависимость расхода материала (G) и скорости перемещения (V) плазматрона от толщины (h) напыленного покрытия

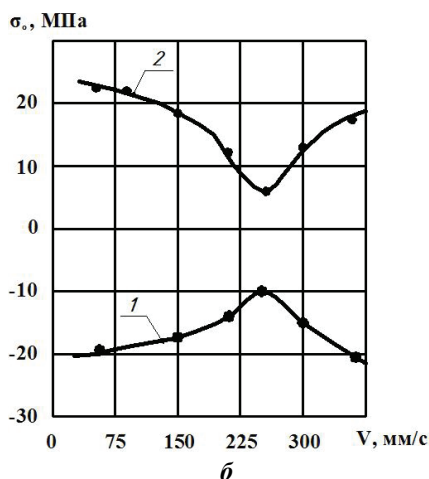
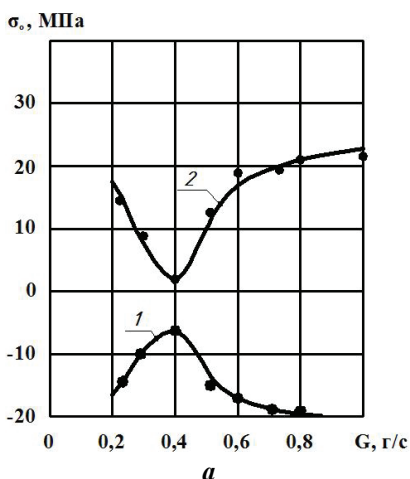


Рис. 4. Результаты численного расчета остаточных напряжений в покрытии Al_2O_3 на границе со стальной основой (1) и среднего напряженного состояния в покрытии (2) от расхода напыляемого материала (G) (а) и скорости перемещения плазматрона (V) (б): а – при толщине покрытия $h = 0,2$ мм и скорости перемещения плазматрона $V = 250$ мм/с; б – при толщине покрытия $h = 0,2$ мм и расходе материала $G = 0,4$ г/с

Анализ полученных результатов показывает, что изменение указанных параметров может привести к многократному повышению уровня остаточных напряжений. При этом минимум среднего напряженного состояния в покрытии соответствует минимуму или изменению знака остаточных напряжений в покрытии на границе с основой. Так, наилучшую работоспособность показывают покрытия, которые обладают остаточными напряжениями сжатия.

На рисунке 5 представлены зависимости прочности сцепления покрытия от толщины без подслоя

(линия 1) и с подслоем из NiCr толщиной 0,1 мм (линия 2), а также результаты измерения прочности сцепления покрытия из Al_2O_3 , напыленного на оптимальных режимах с подслоем из NiCr (линия 3).

Гарантированное покрытие из Al_2O_3 на стали без подслоя получено толщиной не более 0,5...0,8 мм, а с подслоем из NiCr – толщиной 1,0...1,1 мм. При напылении на оптимальных режимах с использованием подслоя из NiCr получено гарантированное покрытие толщиной более 2,5 мм.

Таким образом, оптимизация режимов напыления (расхода материала и скорости перемеще-

ния плазмотрона) позволила получить покрытия из Al_2O_3 на стали, толщиной более чем в два с половиной раза превосходящие толщины, разработанные по традиционной технологии. В дальнейшем при разработке технологий нанесения многофункциональных покрытий повышенной толщины и прочности при восстановлении деталей плазменным напылением необходимо учитывать режимы их эксплуатации.

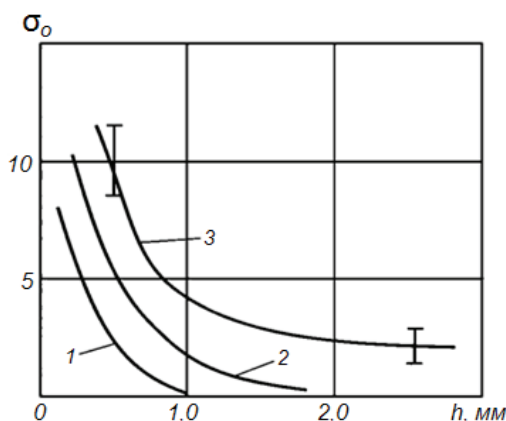


Рис. 5. Зависимость прочности сцепления (σ_0) покрытия из Al_2O_3 на сталь от толщины покрытия (h):
1 – без подслоя; 2 – с подслоем из NiCr;
3 – с подслоем из NiCr на оптимальных режимах

Выводы

1. Снижение уровня остаточных напряжений при их регулировании соответствует повышению прочности сцепления покрытия при постоянстве среднемаховой температуры частиц в процессе напыления. В свою очередь, режимы напыления (ток, расход и состав плазмообразующего газа) определяются из условия обеспечения среднемаховой температуры частиц, соответствующей максимуму прочности сцепления или заданной пористости.

2. Регулирование остаточными напряжениями в системе «покрытие-металлическая основа» возможно путем управления расходом наноси-

мого материала, скоростью перемещения плазмотрона, а также предварительным нагревом подложки и ее охлаждением в процессе напыления.

Библиографический список

1. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением: теория, технология и оборудование. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
2. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2008. 360 с.
3. Пузряков А.Ф. Технологии нанесения защитных и износостойких покрытий повышенной прочности / А.Ф. Пузряков, И.Н. Кравченко, И.К. Соколов [и др.]. М.: Изд-во «Эко-Пресс», 2013. 300 с.
4. Балдаев Л.Х. Газотермическое напыление / Л.Х. Балдаев, В.Н. Борисов, В.Н. Вахалин [и др.]. М.: Старая Басманная, 2015. 539 с.
5. Kuznetsov Y.A., Kravchenko I.N., Goncharenko V.V. Reconditioning and hardening of tillage tools by plasma spraying // Journal of Scientific Society of Power Machines. Tractors and Maintenance. 2016. Vol. 21. № 1. Pp. 41-47.
6. Кравченко И.Н., Пузряков А.Ф., Бобряшов Е.М. Математическое моделирование процесса развития остаточных напряжений при формировании плазменных покрытий // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 11. С. 77-80.
7. Цветков С.В., Соколов И.К., Зурабов В.М. Численный расчет напряженно-деформированного состояния тел за пределами упругости // Пути повышения качества и надежности деталей из порошковых материалов: Тезисы докладов научно-технической конференции. Рубцовск, 1991. С. 85.
8. Кравченко И.Н. Оптимизация технологических режимов нанесения защитных покрытий плазменными методами (TST Plasma Renovation) / И.Н. Кравченко, М.А. Глинский, В.М. Корнев [и др.] // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017619358 (RU). Оpubл. 24.08.2017.

Статья поступила 6 марта 2017

STUDYING STRENGTH OF PLASMA COATINGS WITH INCREASED THICKNESS BY INTERIOR TENSION REGULATION

IGOR N. KRAVCHENKO, DSc (Eng), Professor¹

E-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

MAKSIM A. GLINSKY¹

E-mail: maximagl@yandex.ru

ANASTASIA A. KOLOMEICHENKO¹

E-mail: kolom.anastasiya@gmail.com

ALEKSANDR A. PUPRYAKOV, PhD (Eng), Associate Professor²

E-mail: giperon@rambler.ru

YURI A. SHAMARIN, PhD (Eng), Associate Professor²

E-mail: shamarina@mgul.ac.ru

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; Timiryazevskaya Str., 49; Moscow, 127550, Russian Federation

² Moscow State Technical University named after N.Ye. Bauman (National Research University), 2nd Baumanskaya Str., 5, bld. 1, Moscow, 105005, Russian Federation

To determine the parameters and optimize the modes for plasma deposition (the travel rate of a plasmotron, the flow rate of coating material, etc.), in order to minimize the level of residual stresses the authors have experimentally determined the dependencies of porosity and the coefficients of material utilization and coating formation on the average mass temperature of coating material particles. In this case, rational coating modes (applied current, the flow rate and composition of plasma-forming gas) that affect the thermodynamic properties of a plasma jet and coating particles have been determined in terms of the task to obtain the maximum adhesion strength or specified porosity of the coating. In turn, the travel rate of a plasmotron and the flow rate of the coating material have been optimized by the criterion of minimum residual stresses. The mathematical model serving as a basis for the optimization problem is related to the current, flow and composition of the plasma-forming gas through the average mass temperature of the coating particles making a significant effect on the heat flux. The developed numerical mathematical model of an elastoplastic state of the “coating-metal base” system makes it possible to establish that when the flow of deposited material varies from 0.1 to 1.0 g/s and the travel rate of a plasmotron varies from 10 to 350 mm/s, residual stresses in tungsten, aluminum oxide and PG-19M-01 powder coatings on steel change their sign and can be either compressive or stretching. It has been found that residual compressive stresses are formed in aluminum oxide coatings on an aluminum base, and tensile stresses are formed in tungsten coatings subjected to an insignificant thermal action. Mode variations allow to lower the level of residual stresses to achieve a minimum of 3 ... 5 times. It has been proved that possible stress states experienced by the “coating-metal base” system under the action of external loads without the loss of efficiency represent an area limited by the criteria of adhesion and cohesion strength of the coating and the criterion of the substrate fluidity.

Key words: coating, metal base, system, model, residual stresses.

References

1. Kudinov V.V., Bobrov G.V. Naneseniye pokrytiy napyleniyem: teoriya, tekhnologiya i oborudovaniye [application: theory, technology and equipment]. Moscow, Metallurgiya, 1992. 432 p. (in Rus.)

2. Puzryakov A.F. Teoreticheskiye osnovy tekhnologii plazmennogo napyleniya [Theoretical basis of the technology of plasma spraying. 2nd Ed., re-

vised. and extended]. Moscow, MSTU named after N.Ye. Bauman, 2008. 360 p. (in Rus.)

3. Puzryakov A.F., Kravchenko I.N., Sokolov I.K. [and others]. Tekhnologii naneseniya zashchitnykh i iznosostoykikh pokrytiy povyshennoy prochnosti [Technologies of applying protective and wear-resistant coatings of increased strength]. Moscow, Izd-vo “Eko-Press”, 2013. 300 p. (in Rus.)

4. Baldayev L. Kh., Borisov V.N., Vakhalin V.N. [and others]. Gazotermicheskoye napyleniye [Gas-thermal spraying]. Moscow, Staraya Basmannaya, 2015. 539 p. (in Rus.)

5. Kuznetsov Y.A., Kravchenko I.N., Goncharenko V.V. Reconditioning and hardening of tillage tools by plasma spraying. *Journal of Scientific Society of Power Machines. Tractors and Maintenance*, 2016. Vol. 21. No. 1. Pp. 41-47.

6. Kravchenko I.N., Puzryakov A.F., Bobryashov Ye.M. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa razvitiya ostatochnykh napryazheniy pri formirovaniye plazmennyykh pokrytiy [Mathematical modeling of the development of residual stresses during the formation of plasma coatings]. *Sovremennyye naukovemye tekhnologii*, 2013. No. 11. Pp. 77-80. (in Rus.)

7. Tsvetkov S.V., Sokolov I.K., Zurabov V.M. Chislenny raschet napryazhenno-deformirovannogo sos-

toyaniya tel za predelami uprugosti [Numerical calculation of a stress-strain state of bodies beyond the elasticity limit]. *Puti povysheniya kachestva i nadezhnosti detaley iz poroshkovykh materialov: Tezisy dokladov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Rubtsovsk, 1991. P. 85. (in Rus.)

8. Kravchenko I.N., Glinskiy M.A., Korneyev V.M. [and others]. Optimizatsiya tekhnologicheskikh rezhimov naneseniya zashchitnykh pokrytiy plazmennymi metodami (TST Plasma Renovation) [Optimization of technological modes of applying protective coatings by plasma methods (TST Plasma Renovation)]. Certificate of state registration of computer program No. 2017619358 (RU). Publ. on 24.08.2017. (in Rus.)

The paper was received on March 6, 2017

УДК 621.791.927.55

DOI 10.26897/1728-7936-2017-5-48-53

ЕРОХИН МИХАИЛ НИКИТЬЕВИЧ, докт. техн. наук, академик РАН, профессор¹

E-mail: Er.mihn@mail.ru

КАЗАНЦЕВ СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ, докт. техн. наук, профессор¹

E-mail: kspts@bk.ru

ЧУПЯТОВ НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент²

E-mail: nikolaj-ch@mail.ru

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Российская Федерация

² Тверской государственный технический университет, набережная Афанасия Никитина, 22, г. Тверь, 170026, Российская Федерация

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ КАРБИДОСОДЕРЖАЩИХ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

В работе отражены результаты исследования износостойкости CVD-покрытий, полученных термическим разложением карбида хрома на подложке, изготовленной из стали 45 ГОСТ 1050-88, в сравнении с образцами без покрытий: цементированной и закалённой до HRC54...56 сталью 15X ГОСТ 4543-71 и сталью 45 ГОСТ 1050-88 с закалкой ТВЧ до HRC52...54. Эксперименты с исследованием износостойкости выполнялись с образцами «диск-колодка» на машине трения СМЦ-2. Износостойкость поверхностей оценивалась как визуально (по наличию следов изнашивания), так и по потере массы образцов. Установлено, что сопряжения с дисками, имеющими карбидохромовое покрытие, обладают более высокой устойчивостью к воздействию кварцевых абразивных частиц, чем сопряжения с дисками, изготовленными с применением классических технологий. Максимальное повышение износостойкости наблюдается при микротвёрдости покрытия 17 ГПа и выше. Ни на одном из образцов, имеющих CVD-покрытие после испытаний, не выявлено дефектов покрытия (отслаиваний, сколов и др.). На основании полученных результатов в работе сделан обоснованный вывод о возможности применения карбидохромовых покрытий, полученных термическим разложением гексакарбонила хрома, для восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники.

Ключевые слова: хромовые покрытия, CVD-метод, металлизация, гексакарбонил хрома, карбид хрома, карбидохромовые покрытия, износостойкость.