

УДК 621.793.74: 621.791.927.55

UDC 621.793.74: 621.791.927.55

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ ПЛАЗМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ С ОДНОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ**

**THEORETICAL PARAMETER OPTIMIZATION OF COATING PLASMA SPRAYING WITH SIMULTANEOUS ELECTROMECHANICAL TREATMENT**

Никонов Вадим Олегович  
 ассистент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин  
*Воронежская государственная лесотехническая академия, Воронеж, Россия*

Nikonov Vadim Olegovich  
 assistant  
*Voronezh State Forestry Academy, Voronezh, Russia*

Представлены результаты теоретической оптимизации показателей качества покрытия полученного плазменным напылением с одновременной электро-механической обработкой. Получены оптимальные параметры процесса

In the article we have shown the results of theoretical optimization of quality coatings produced by plasma spraying with simultaneous electro-mechanical processing. The optimal process parameters

Ключевые слова: ОПТИМИЗАЦИЯ, ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ, ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА, ДЕТАЛЬ, ПЛАЗМЕННОЕ ПОКРЫТИЕ

Keywords: OPTIMIZATION, PLASMA SPRAYING, ELECTROMECHANICAL TREATING, DETAIL, PLASMA COATING

Одним из наиболее эффективных методов повышения качества напыляемых плазменных покрытий является электро-механическая обработка, которая позволяет достичь повышения микротвердости покрытий на 60-70 % и увеличить адгезионную прочность в 3 раза. Однако последующая после напыления электро-механическая обработка имеет ограничения по максимальной толщине покрытий, при которых они не разрушаются. Это обстоятельство приводит к повышению трудоемкости нанесения и упрочнения покрытий толщиной, сопоставимой с разницей между диаметром шеек нового коленчатого вала и их последним ремонтным размером.

Устранение указанного ограничения по критической толщине покрытия возможно за счет совмещения в одной технологической операции процессов плазменного напыления покрытия и одновременной электро-механической обработки. Совмещение операций нанесения и упрочнения покрытий имеет преимущества перед другими методами и позволяет уменьшить время на обработку детали, подготовительно-заключительное время, сэкономить энергию, способствует увеличению производительности и эффек-

тивности получения качественных покрытий [1].

Ранее было изучено влияние отдельных параметров  $F_i$  (факторов оптимизации) процесса нанесения покрытия на показатели качества покрытия (критерии оптимизации). В частности, получены серии графиков  $\rho(F_i)$ ,  $R_q(F_i)$ ,  $\sigma_{\text{ког}}(F_i)$  и  $\sigma_{\text{ост}}(F_i)$ , часть которых представлены на рисунках 1 и 2 [2].

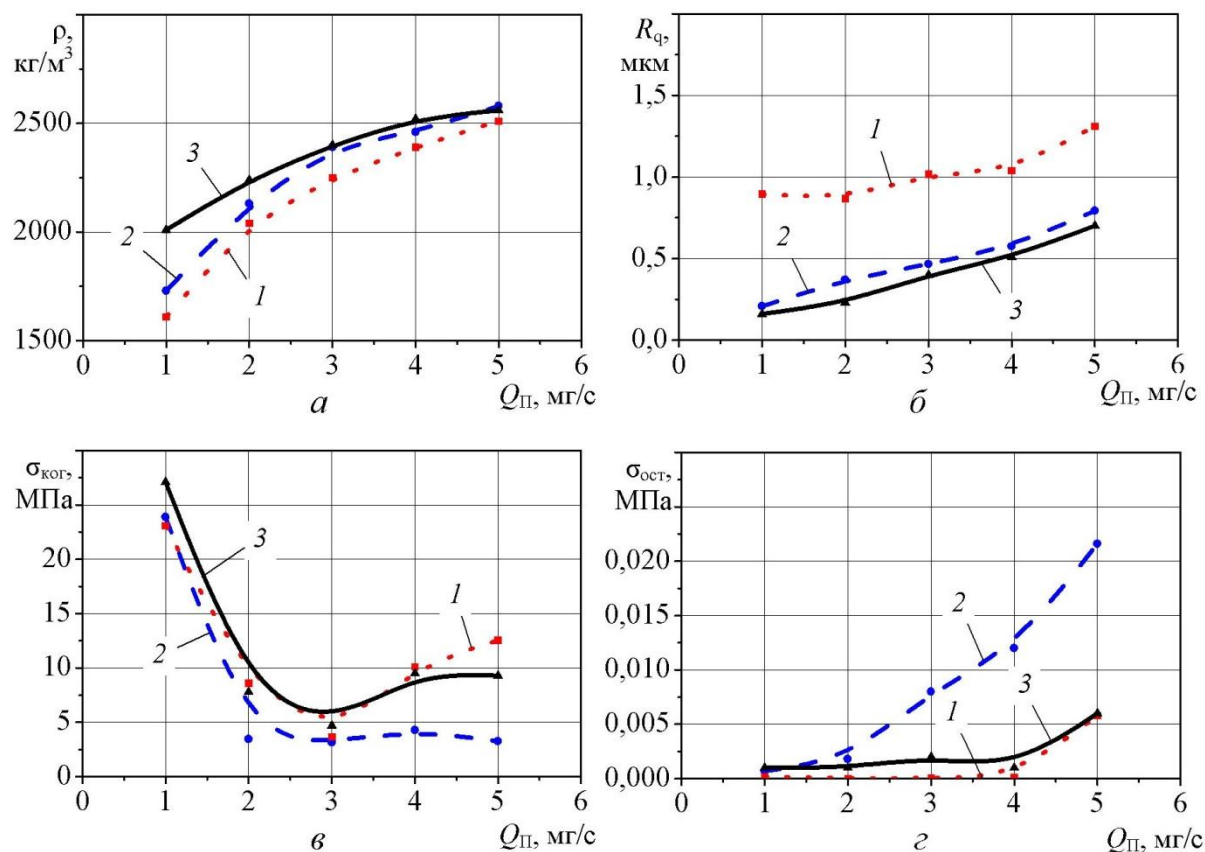


Рис. 1. Влияние расхода порошка  $Q_{\text{п}}$  на плотность образующегося покрытия – а; шероховатость поверхности – б; когезионную прочность покрытия – в и величину остаточных напряжений – г: 1 – без обкатки роликом; 2 – обкатка роликом без пропуска электрического тока; 3 – электромеханическая обработка роликом

Однако однофакторные зависимости позволяют оценить влияние каждого из факторов, но не дают информации об одновременном влиянии на критерий двух или большего количества факторов. Поэтому следующим закономерным этапом исследования является получение и анализ двухфакторных зависимостей вида  $P(F_i, F_j)$ .

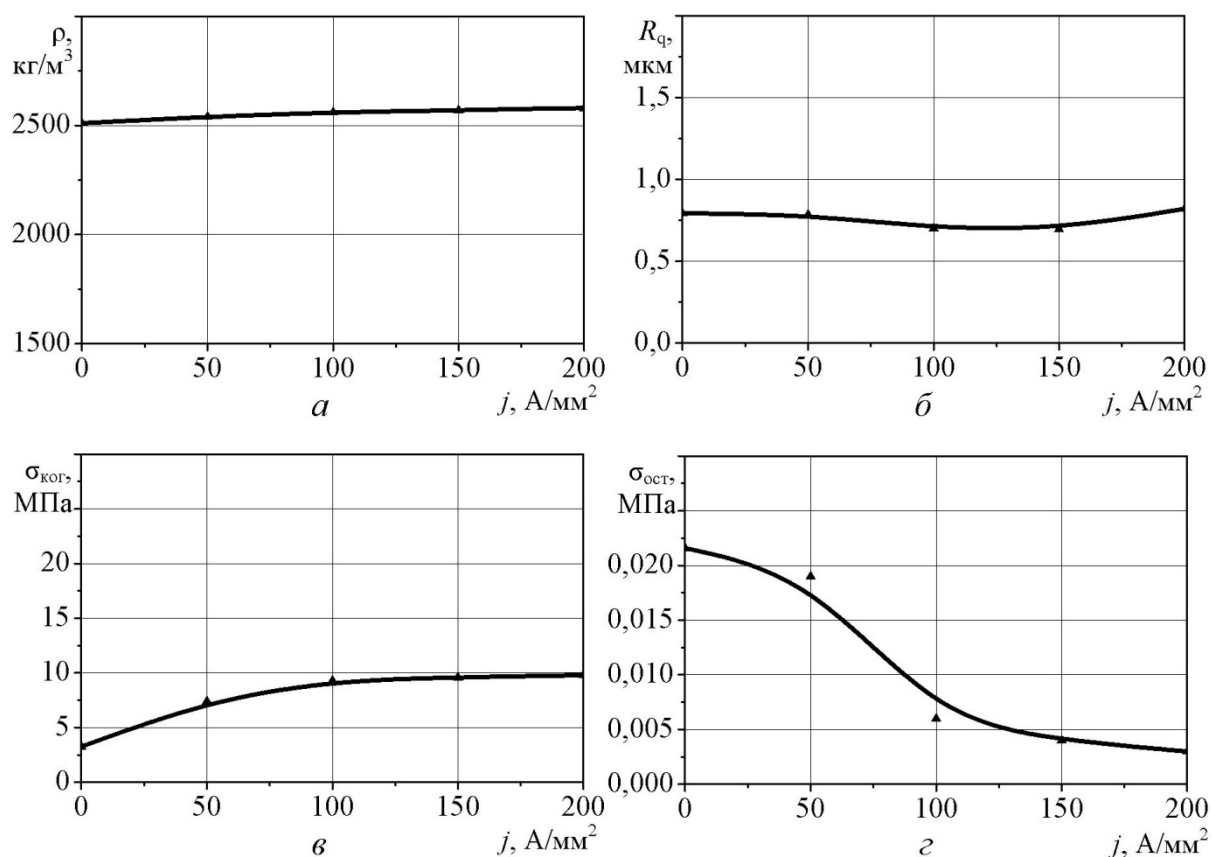


Рис. 2. Влияние плотности тока через покрытие на плотность образующегося покрытия – *a*; шероховатость поверхности – *б*; когезионную прочность покрытия – *в* и величину остаточных напряжений – *з* при ЭМО

Оптимизация сложных систем в общем случае сводится к задаче отыскания экстремума функции нескольких переменных. В ходе решения задачи оптимизации необходимо определить такие области изменения входных параметров  $F_i$ , при которых выходные показатели покрытия удовлетворяют некоторому принятому критерию, либо нескольким частным критериям. В качестве критериев оптимизации обычно выступают показатели производительности, качества и экономических затрат [3].

В данном случае в качестве критериев целесообразно выбрать показатели качества покрытия  $\rho$ ,  $R_q$ ,  $\sigma_{\text{ког}}$ ,  $\sigma_{\text{ост}}$ . В качестве факторов выбран один из показателей процесса плазменного нанесения покрытия – расход порошка  $Q_{\text{п}}$ , а в качестве второго фактора выбран наиболее важный показатель процесса электрохимической обработки – плотность тока в месте

контакта обкатывающего ролика и покрытия  $j$ .

В процессе решения задачи оптимизации производился поиск такого набора параметров  $(Q_{II}, j)$ , при которых  $\rho$  была бы как можно большей,  $R_q$  как можно меньшей,  $\sigma_{\text{ког}}$  как можно большими,  $\sigma_{\text{ост}}$  как можно меньшими. Поэтому задачу оптимизации можно записать аналитически следующим образом:

$$\begin{cases} r(Q_{II}, j) \rightarrow \max; \\ R_q(Q_{II}, j) \rightarrow \min; \\ s_{\text{ког}}(Q_{II}, j) \rightarrow \max; \\ s_{\text{ост}}(Q_{II}, j) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (1)$$

Для установления взаимосвязи между факторами и критериями проведена серия из 25 компьютерных экспериментов ( $5 \times 5 = 25$ ), в которых фактор  $Q_{II}$  варьировали на уровнях 1, 2, 3, 4, 5 мг/с, одновременно варьируя фактор  $j$  на уровнях 0, 50, 100, 150, 200 А/мм<sup>2</sup> (табл.1).

Большую ценность представляли бы аппроксимационные зависимости, по которым можно рассчитать показатели эффективности  $\rho$ ,  $R_q$ ,  $\sigma_{\text{ког}}$ ,  $\sigma_{\text{ост}}$  по заданным параметрам  $Q_{II}j$ . Аппроксимационные зависимости будем искать в виде полиномов второго порядка вида

$$P(Q_{II}, j) = k_1 Q_{II}^2 + k_2 j^2 + k_3 Q_{II} \cdot j + k_4 Q_{II} + k_5 j + k_6, \quad (2)$$

где  $P$  – рассчитываемый показатель ( $\rho$ ,  $R_q$ ,  $\sigma_{\text{ког}}$ ,  $\sigma_{\text{ост}}$ );  $k_1 \dots k_6$  – коэффициенты многочлена [4].

Для определения коэффициентов зависимостей  $P(Q_{II}, j)$  будем использовать аппроксимацию методом наименьших квадратов [5]. Метод заключается в решении обратной задачи для определения таких коэффициентов  $k_1 \dots k_6$ , при которых суммарное квадратичное отклонение аналитической зависимости от экспериментальных данных будет минимальным:

Таблица 1 – Показатели качества покрытия  $\rho$ ,  $R_q$ ,  $\sigma_{\text{ког}}$ ,  $\sigma_{\text{ост}}$  в зависимости от параметров процесса  $Q_{\text{П}ij}$

№ п/п	$Q_{\text{П}}$ , мг/с	$j$ , А/мм <sup>2</sup>	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$R_q$ , мкм	$\sigma_{\text{ког}}$ , МПа	$\sigma_{\text{ост}}$ , МПа
1	1	0	1730	0,21	23,9	0,001
2	1	50	1980	0,19	25,8	0,001
3	1	100	2010	0,16	27,1	0,001
4	1	150	2310	0,14	31,4	0,001
5	1	200	2480	0,21	28,3	0,001
6	2	0	2130	0,37	3,5	0,002
7	2	50	2185	0,32	7,2	0,002
8	2	100	2240	0,23	7,8	0,001
9	2	150	2400	0,20	10,1	0,002
10	2	200	2520	0,26	9,0	0,001
11	3	0	2390	0,47	3,2	0,008
12	3	50	2390	0,45	5,9	0,004
13	3	100	2400	0,40	4,7	0,002
14	3	150	2450	0,38	6,6	0,002
15	3	200	2570	0,42	5,8	0,002
16	4	0	2460	0,57	4,3	0,012
17	4	50	2500	0,55	7,0	0,006
18	4	100	2520	0,51	9,5	0,001
19	4	150	2500	0,51	9,3	0,003
20	4	200	2575	0,54	9,3	0,003
21	5	0	2510	0,79	3,3	0,022
22	5	50	2540	0,79	7,4	0,019
23	5	100	2560	0,70	9,3	0,006
24	5	150	2570	0,70	9,6	0,004
25	5	200	2580	0,82	9,8	0,003

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{Э}}} (P_{\text{аналит.}}(Q_{\text{П}}^i, j^i) - P_{\text{табл.}}^i(Q_{\text{П}}^i, j^i))^2 \rightarrow \min, (3)$$

где  $i$  – номер компьютерного эксперимента;  $N_{\text{Э}}$  – общее количество компьютерных экспериментов;  $P_{\text{аналит.}}$  – аналитическая зависимость показателя  $P$  от факторов;  $P_{\text{табл.}}^i$  – табличные значения показателя  $P$  для  $i$ -го компьютерного эксперимента.

Аппроксимация методом наименьших квадратов произведена с использованием математического пакета MathCAD 14. В результате аппроксимации получены следующие формулы для прогноза (4-7):

$$\rho(Q_{\Pi}, j) = -27Q_{\Pi}^2 + 3,45 \cdot 10^{-3}j^2 - 0,817Q_{\Pi} \cdot j + 355Q_{\Pi} + 3,22j + 1,48 \cdot 10^3; (4)$$

$$R_q(Q_{\Pi}, j) = 0,016Q_{\Pi}^2 + 6,30 \cdot 10^{-6}j^2 + 5,60 \cdot 10^{-5}Q_{\Pi} \cdot j + 0,040Q_{\Pi} - 1,69 \cdot 10^{-3}j + 0,198 \cdot 10^3; (5)$$

$$\sigma_{\text{ког}}(Q_{\Pi}, j) = 3,18Q_{\Pi}^2 - 2,07 \cdot 10^{-4}j^2 - 22,9Q_{\Pi} + 0,066j + 41,4; (6)$$

$$\sigma_{\text{ост}}(Q_{\Pi}, j) = 7,0 \cdot 10^{-4}Q_{\Pi}^2 + 2,51 \cdot 10^{-7}j^2 - 2,50 \cdot 10^{-5}Q_{\Pi} \cdot j + 6,0 \cdot 10^{-4}Q_{\Pi} - 1,13 \cdot 10^{-5}j - 2,43 \cdot 10^{-4}; (7)$$

где  $\rho$  измеряется в  $\text{кг/м}^3$ ,  $R_q$  – в мкм,  $\sigma_{\text{ког}}$  и  $\sigma_{\text{ост}}$  – в МПа.

Для оценки значимости коэффициентов полиномов использовали  $t$ -критерий Стьюдента (был принят уровень значимости 0,05) [6]. Один из коэффициентов в формуле (6) оказался статистически не значимым. В приведенных формулах коэффициенты приведены без указания величины стандартной ошибки. Полученные аналитические формулы  $\rho(Q_{\Pi}, j)$ ,  $R_q(Q_{\Pi}, j)$ ,  $\sigma_{\text{ког}}(Q_{\Pi}, j)$  и  $\sigma_{\text{ост}}(Q_{\Pi}, j)$  могут быть использованы для быстрой оценки результатов процесса нанесения покрытия при выборе параметров процесса.

При двухфакторной оптимизации появляется возможность графически изобразить поверхности отклика и провести их визуальный анализ (рис.3) [7]. Анализируя каждую из поверхностей отклика, представленную с помощью линий уровня (рис.4), можно условно разделить факторное пространство на две области: благоприятную (такие области затемнены на рисунке), в которой критерий оптимизации принимает искомые оптимальные значения, и неблагоприятную. Выбор границы между благоприятной и неблагоприятной областью производится экспертным путем. При этом целесообразно руководствоваться следующими правилами: благоприятная область должна содержать искомые максимальные или минимальные значения функции, зани-

мать значительную долю факторного пространства (10-30 %), и по возможности не включать области резкого изменения функции [8-10]. Руководствуясь данными соображениями, в качестве границ между благоприятной и неблагоприятной областями выбраны следующие изолинии: для функции  $\rho(Q_{П,j})$  изолинию  $2500 \text{ кг/м}^3$ ; для  $R_q(Q_{П,j})$  изолинию  $0,5 \text{ мкм}$ ; для  $\sigma_{\text{ког}}(Q_{П,j})$  изолинию  $10 \text{ МПа}$ , для  $\sigma_{\text{ост}}(Q_{П,j})$  изолинию  $0,005 \text{ МПа}$ .

Наложение благоприятных областей дает общую оптимальную область треугольной формы (рис.4, внизу справа). В факторном пространстве  $(Q_{П}, j)$  благоприятные области затемнены, а общая оптимальная область выделена черным цветом. Оптимальной области соответствует диапазон расхода порошка  $3,8\text{-}4,8 \text{ мг/с}$  и диапазон плотности тока  $90\text{-}200 \text{ А/мм}^2$ .

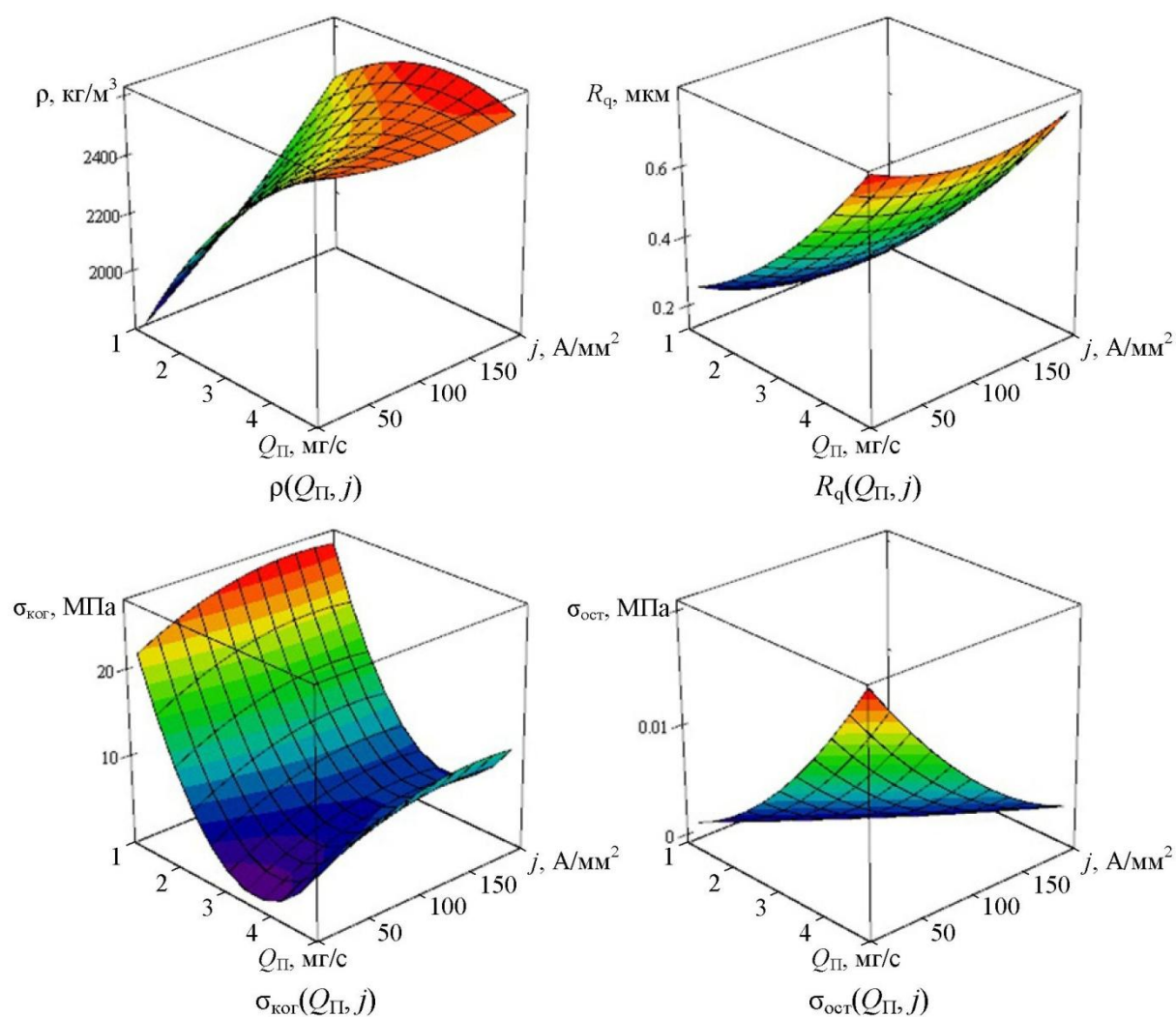
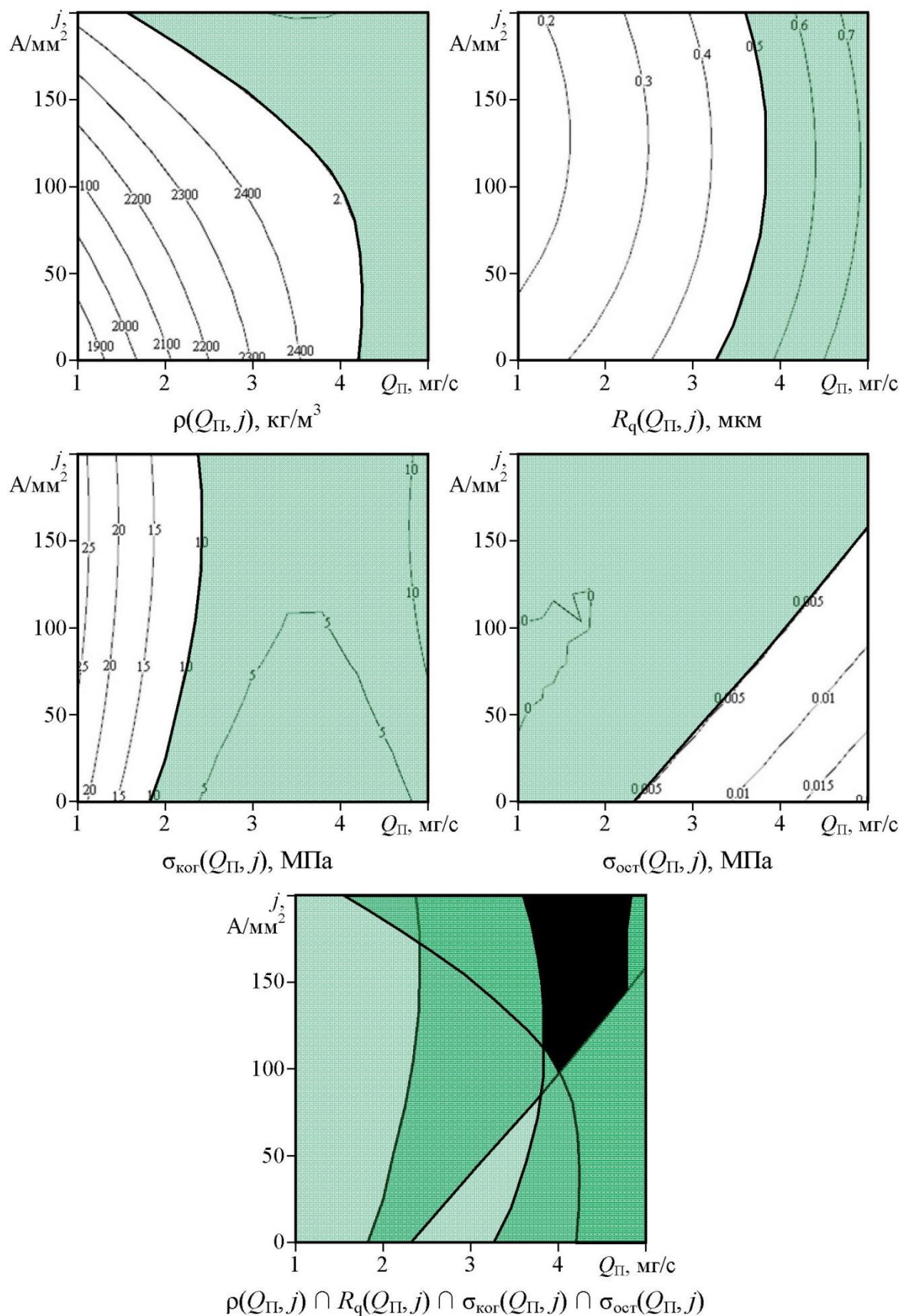


Рис.3. Поверхности отклика к оптимизации параметров процесса нанесения покрытия





#### Рис.4. Карты оптимизации параметров процесса нанесения покрытия

Таким образом, на основе двухфакторной оптимизации сформулированы рекомендации по выбору значений параметров процесса плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой. Расход порошка должен составлять 3,8-4,8 мг/с; плотность тока 90-200 А/мм<sup>2</sup>. При этих параметрах процесса обеспечивается плотность образующегося покрытия  $\rho$  более 2500 кг/м<sup>3</sup>, шероховатость поверхности  $R_q$  менее 0,5 мкм, когезионная прочность покрытия  $\sigma_{\text{ког}}$  более 10 МПа, остаточные напряжения менее  $\sigma_{\text{ост}}$  менее 0,5 МПа.

#### Список литературы

1 Пат. 2480533 РФ, МПК С23С4/18, В24В39/06, В23Н9/00. Способ комбинированного упрочнения поверхностей деталей [Текст] / А. М. Кадырметов, Г. А. Сухочев, В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев, А. Ф. Мальцев ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Доступная робототехника" – № 2011140996/02 ; заявл. 11.10.2011 ; опубл. 27.04.2013, Бюл. № 12. – 8 с.

2 Кадырметов, А. М. Оценка качества плазменных покрытий, нанесенных комбинированным методом с обкаткой роликом, полученная на основе компьютерного моделирования / А. М. Кадырметов, В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – № 03 (87).

3 Финни, Д. Введение в теорию планирования экспериментов: Пер. с англ. М.: ГРФМЛ изд-ва Наука, 1970. – 287 с.

4 Горский, В. Г. Планирование промышленных экспериментов (модели динамики) [Текст] : учеб. пособие / В. Г. Горский, Ю. П. Адлер, А. М. Талалай – М. : Metallurgia, 1978. – 288 с.

5 Кузьмичев, Д. А. Автоматизация экспериментальных исследований [Текст] : учеб. пособие / Д. А. Кузьмичев, И. А. Радкевич – М. : Наука. Главн. ред. физико-мат. литер., 1983. – 392 с.

6 Румшинский, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента [Текст] : справочное руководство / Л. З. Румшинский – М. : Наука, 1971. – 192 с.

7 Premoze, S. Particle Based Simulation of Fluids [Text] / S. Premoze, T. Tasdizen, J. Bigler et al. // Eurographics. – 2003. – Vol. 22. – № 3. – P. 103-113.

8 Грановский, В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях [Текст] : учеб. пособие / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 288 с.

9 Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений [Текст] : учеб. пособие / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский – М. : Наука, 1976. – 279 с.

10 Дегтярев Ю.И. Методы оптимизации [Текст] : Учеб. пособие для вузов. – М.:

Сов.радио, 1980. – 272 с.

### References

- 1 Pat. 2480533 RF, MPK S23S4/18, B24B39/06, B23H9/00. Sposobkombinirovannogouprochnenijapoverhnostejdetalej [Tekst] / A. M. Kadyrmetov, G. A. Suhochev, V. I. Posmet'ev, V. O. Nikonov, V. V. Posmet'ev, A. F. Mal'cev ; zajavitel' ipatento-obladatel' Obshhestvo s ogranichennojotvetstvennost'ju "Dostupnajarobototehnika" – № 2011140996/02 ; zajavl. 11.10.2011 ;opubl. 27.04.2013, Bjul.№ 12. – 8 s
- 2Kadyrmetov, A. M. Ocenkakachestvaplazmennyhpokrytij, nanesennyhkombinirovannymmetodom s obkatkojrolikom, poluchennajanaosnovekomp'juternogomodelirovanija / A. M. Kadyrmetov, V. I. Posmet'ev, V. O. Nikonov, V. V. Posmet'ev // PolitematicheskijsetevojjelektronnyjnauchnyjzhurnalKubanskogogosudarstvennogoagrarnogouniversiteta (NauchnyjzhurnalKubGAU) [Elektronnyjresurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2013. – № 03 (87)
- 3Finni,D. Vvedenievteorijuplanirovanijajeksperimentov: Per. sangl.M.: GRFML izd-vaNauka, 1970. – 287 s.
- 4Gorskij, V. G. Planirovaniepromyshlennyhjekspriimentov (modelidinamiki) [Tekst] :ucheb. posobie / V. G. Gorskij, Ju. P. Adler, A. M. Talalaj – M. :Metallurgija, 1978. – 288 s.
- 5Kuz'michev, D. A. Avtomatizacijajeksperimental'nyhissledovanij [Tekst] :ucheb. posobie / D. A. Kuz'michev, I. A. Radkevich – M. : Nauka. Glavn.red. fiziko-mat. liter., 1983. – 392 s.
- 6Rumshiskij, L. Z. Matematicheskajaobrabotkarezul'tatovjekspriimenta [Tekst] :spravochnoerukovodstvo / L. Z. Rumshinskij – M. : Nauka, 1971. – 192 s.
- 7 Premoze, S. Particle Based Simulation of Fluids [Text] / S. Premoze, T. Tasdizen, J. Bigler et al. // Eurographics. – 2003. – Vol. 22. – № 3. – P. 103-113.
- 8Granovskij, V. A. Metodyobrabotkijeksperimental'nyhdannyhpriizmere-nijah [Tekst] :ucheb. posobie / V. A. Granovskij, T. N. Siraja – L. : Jenergoatomizdat. Leningr.otd-nie, 1990. – 288 s.
- 9 Adler, Ju. P. Planirovaniejekspriimentapriipoiskeoptimal'nyhreshenij [Tekst] :ucheb. posobie / Ju. P. Adler, E. V. Markova, Ju. V. Granovskij – M. :Nauka, 1976. – 279 s.
- 10Degtjarev,Ju.I. Metodyoptimizacii [Tekst] :Ucheb. posobiedljavuzov. – M.:Sov. radio, 1980. – 272 s.