

УДК 621.793

М.А. ЛЕВАНЦЕВИЧ, канд. техн. наук, доц.
ведущий научный сотрудник¹
E-mail: levancev@mail.ru

Н.Н. МАКСИМЧЕНКО, канд. техн. наук
ведущий научный сотрудник¹
E-mail: maksnat2001@mail.ru

Е.В. ПИЛИПЧУК
ассистент²
E-mail: yahor_pilipchuk@mail.ru

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 14.08.2020.

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПОЛИРОВАНИЯ ПЛАКИРОВАННЫХ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ

В результате экспериментально-статистического моделирования получены зависимости, устанавливающие влияние режимов полирования (число проходов полировального круга, величина натяга круга) на шероховатость и толщину хромового покрытия, полученного методом деформационного плакирования гибким инструментом. Установлено, что в пределах выбранных интервалов варьирования факторов увеличение натяга полировального круга и числа проходов круга приводит к уменьшению как параметра шероховатости R_a , так и толщины покрытия, однако с разной степенью интенсивности. На величину шероховатости поверхности плакированного слоя после полирования определяющее влияние оказывает число проходов полировального круга. Влияние режимов полирования на толщину плакированного покрытия носит более сложный характер, так как проявляется как в индивидуальном сопоставимом влиянии обоих факторов, так и в их взаимодействии. Определены оптимальные режимы полирования штоков гидроцилиндров, подвергнутых хромированию методом деформационного плакирования гибким инструментом. По результатам опытной проверки в условиях ОАО «Минский завод автоматических линий имени П.М. Машерова» (Республика Беларусь) установленные технологические режимы полирования были добавлены в технологический процесс хромирования штоков, что подтверждает эффективность использования расчетных зависимостей.

Ключевые слова: деформационное плакирование гибким инструментом, покрытие, шток гидроцилиндра, хромирование, полирование, шероховатость, планирование эксперимента

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-4-53-70-76>

Введение. В настоящее время для улучшения эксплуатационных характеристик поверхностного слоя все чаще используется технология деформационного плакирования гибким инструментом (ДПГИ), сочетающая поверхностное упрочнение с формированием покрытия [1–12]. Сущность метода заключается в переносе частиц материала покрытия (донора) на поверхность детали гибким инструментом (проволочным ворсом вращающейся металлической щетки). Метод ДПГИ характеризуется простотой реализации, несложностью исполнения необходимых технических средств, низкими значениями трудо- и энергоемкости в сравнении с другими методами формирования покрытий (гальванические, газотермические и др. [2]), а также экологической чистотой. Разновидностью

технологии ДПГИ является электроимпульсное (электрофрикционное) плакирование гибким инструментом [13–17], при котором используется дополнительная интенсификация процесса формирования покрытия за счет подачи электрического тока. Сочетание пластического деформирования гибким инструментом и скоростного электронного нагрева поверхностного слоя обрабатываемой детали позволяет существенно повысить эффективность процесса нанесения покрытий методом ДПГИ.

Исследования, выполненные авторами ранее, показали, что метод ДПГИ можно успешно применять для хромирования штоков гидроцилиндров металлорежущих станков вместо экологически вредного гальванического хромирования штоков [18–20]. В большинстве случаев компо-

зиционное покрытие из хрома, сформированное методом ДПГИ, не требует дополнительной механической обработки, однако при использовании в качестве гибкого инструмента щетки с провололочным ворсом из нержавеющей стали параметр шероховатости R_a поверхности сформированного покрытия значительно превышает установленные для штоков гидроцилиндров пределы [19]. Поэтому после деформационного плакирования рабочие поверхности штоков подвергают полированию войлочным кругом. Кроме снижения шероховатости поверхности, полирование дополнительно способствует повышению гидроемкости покрытия, по сравнению с неполированным плакированным покрытием и гальваническим хромовым покрытием [19, 20]. Так как толщина сформированных хромовых покрытий обычно не превышает 10...15 мкм, при чрезмерной длительности процесса полирования существует вероятность удаления покрытия целиком. Поэтому **цель настоящей работы** заключалась в экспериментальной оценке влияния технологических режимов полирования на шероховатость (параметр R_a) и толщину h хромового покрытия, полученного методом деформационного плакирования гибким инструментом.

Для достижения поставленной цели требуется определить диапазон оптимальных технологических режимов полирования, позволяющих обеспечить класс шероховатости поверхности, соответствующий требованиям, предъявляемым к штокам гидроцилиндров, при сохранении достаточной толщины плакированного слоя.

Методика проведения исследований. Для определения оптимальных технологических режимов полирования использовали статистические методы планирования эксперимента, позволяющие при минимальном числе опытов получать модели многофакторных процессов.

В настоящем исследовании в качестве варьируемых факторов были взяты технологические параметры процесса полирования, существенно влияющие на шероховатость и толщину сформированного плакированного слоя: число проходов n полировального круга по обрабатываемой поверхности (фактор x_1); натяг N полировального круга по отношению к обрабатываемой поверхности (фактор x_2).

Результаты предварительных экспериментов показали, что зависимость величин шероховатости и толщины плакированного покрытия от варьируемых факторов процесса полирования можно аппроксимировать полиномом второй степени, поэтому математическая модель уравнения отклика от независимых переменных с учетом эффектов их взаимодействий и ошибки эксперимента имеет вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2, \quad (1)$$

где y — параметр оптимизации; x_1, x_2 — варьируемые факторы; $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ — коэффициен-

ты регрессии, описывающие направление и степень влияния каждого из факторов на параметр оптимизации.

В этом случае для получения модели процесса предпочтительнее использовать некомпозиционные планы второго порядка. В частности, для процесса с двумя факторами, как в данном случае, рациональным является ротатабельный план типа правильного шестиугольника, приведенный на рисунке 1, на котором указаны номера опытов, а в скобках — уровни факторов в этих опытах. Обычно количество опытов в центре плана принимают равным 4. В таком случае рассматриваемый план предусматривает проведение 10 опытов, из которых 6 выполняются при уровнях факторов, указанных в вершинах шестиугольника, и 4 опыта — при уровнях факторов, соответствующих центру плана.

Матрица плана представлена в таблице 1, а уровни и соответствующие им значения варьируемых факторов, выбранные на основе результатов предварительных экспериментальных исследований, — в таблице 2.

Параметры оптимизации — параметр шероховатости R_a и толщина h плакированного слоя после полирования.

Толщину покрытия измеряли на цилиндрических образцах с помощью пассаметра с точностью 1 мкм. На каждом образце измерения толщины покрытия производили 6...8 раз и вычисляли средние значения.

Параметр шероховатости поверхности R_a оценивался с помощью профилометра модели 253 производства ОАО «Минский завод «Калибр» (Республика Беларусь).

Полирование плакированного хромового покрытия на экспериментальных образцах осуществляли войлочным кругом диаметром 200 мм, шириной 30 мм с использованием пасты алмазной СА-АСМ 2/1 по технологическим режимам полирования, соответствующим матрице планирова-

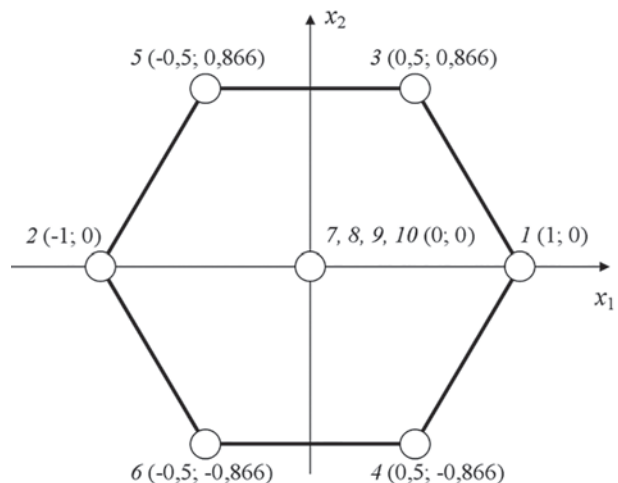


Рисунок 1 — Некомпозиционный ротатабельный план второго порядка для двух факторов [21]
Figure 1 — Non-compositional rotatable second-order design for two factors [21]

Таблица 1 — Матрица некомпозиционного ротatable второго порядка для двух факторов
Table 1 — Matrix of non-compositional rotatable second-order design for two factors

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	x_1^2	x_2^2	y
1	+1	+1	0	0	+1	0	y_1
2	+1	-1	0	0	+1	0	y_2
3	+1	+0,5	+0,866	+0,433	+0,25	+0,75	y_3
4	+1	+0,5	-0,866	-0,433	+0,25	+0,75	y_4
5	+1	-0,5	+0,866	-0,433	+0,25	+0,75	y_5
6	+1	-0,5	-0,866	+0,433	+0,25	+0,75	y_6
7	+1	0	0	0	0	0	y_7
8	+1	0	0	0	0	0	y_8
9	+1	0	0	0	0	0	y_9
10	+1	0	0	0	0	0	y_{10}

Таблица 2 — Уровни и значения технологических факторов
Table 2 — Levels and values of technological factors

Факторы	Обозначение	Уровни факторов						
		-1	-0,866	-0,5	0	+0,5	+0,866	+1
		Соответствующие уровням значения факторов						
Число проходов n	x_1	3	—	4	5	6	—	7
Натяг N , мм	x_2	—	0,5	—	1,0	—	1,5	—

ния эксперимента, после чего определяли толщину покрытия и его шероховатость как средние из 6–8 измерений (таблица 3).

По данным опытов, проведенных согласно матрице планирования, вычисляли коэффициенты модели (1) для шероховатости и толщины покрытия, используя приведенные в [21] формулы.

Анализ полученных результатов. После статистической обработки результатов опытов в соответствии с формулами и методиками, приведенными в [21], получили уравнения регрессии следующего вида:

- для шероховатости R_a :

$$y_R = 0,18 - 0,145x_1 - 0,026x_2 + 0,06x_1^2 + 0,023x_2^2; \quad (2)$$

Таблица 3 — Режимы полирования и результаты замеров шероховатости и толщины покрытия
Table 3 — Polishing modes and results of measurements of roughness and thickness of the coating

Номер опыта	n	N , мм	R_a , мкм	h , мкм	Номер опыта	n	N , мм	R_a , мкм	h , мкм
1	7	1	0,08	2	6	4	0,5	0,3	8,5
2	3	1	0,4	6	7	5	1,0	0,18	3,5
3	6	1,5	0,14	0	8	5	1,0	0,20	4
4	6	0,5	0,17	8	9	5	1,0	0,16	3
5	4	1,5	0,24	3	10	5	1,0	0,18	3,5

- для толщины h :

$$y_h = 3,5 - 1,917x_1 - 3,897x_2 - 1,443x_1x_2 + 0,5x_1^2 + 1,667x_2^2. \quad (3)$$

Проверка полученных моделей по F -критерию (критерию Фишера) подтвердила их адекватность при 5-процентном уровне значимости.

Полученные зависимости (2) и (3) позволяют управлять технологическими режимами процесса полирования, входящими в область эксперимента, с целью получения требуемых эксплуатационных характеристик лакированного покрытия. На рисунках 2 и 3 приведены поверхности, построенные с использованием полученных уравнений. Следует отметить, что речь идет о кодированных обозначениях и значениях уровней факторов x_1 и x_2 , поэтому на рисунках 2 и 3 обозначены безразмерные величины y_R и y_h соответственно.

Анализ регрессионного уравнения (2) и поверхности, приведенной на рисунке 2, показывает, что на величину шероховатости поверхности лакированного слоя после полирования определяющее влияние оказывает фактор x_1 , причем это влияние имеет обратную зависимость, слегка ослабляемую положительным коэффициентом при второй степени фактора x_1 . Влияние фактора x_2 на порядок менее существенно. Таким образом, для уменьшения величины шероховатости лакированного покрытия фактор x_1 следует устанавливать на верхнем уровне.

Что касается толщины лакированного покрытия после полирования, определяемой уравнением (3), здесь наблюдается обратная картина (см. рисунок 3): определяющее влияние на толщину лакированного слоя после полирования оказывает фактор x_2 , причем его влияние проявляется как индивидуально, так и во взаимодействии с фактором x_1 . Как и в случае с шероховатостью поверхности, это влияние имеет обратную зависимость, однако положительный коэффициент при второй степени фактора x_2 значительно ослабляет ее. Кроме того, влияние фактора x_1 на толщину остаточного слоя хоть и уступает по значимости фактору x_2 , но является сопоставимым с ним.

Все это позволяет заключить, что исследуемые факторы x_1 и x_2 , как индивидуально, так и во взаимодействии, оказывают на толщину лакированного покрытия после полирования более сложное влияние, чем на его шероховатость после полирования.

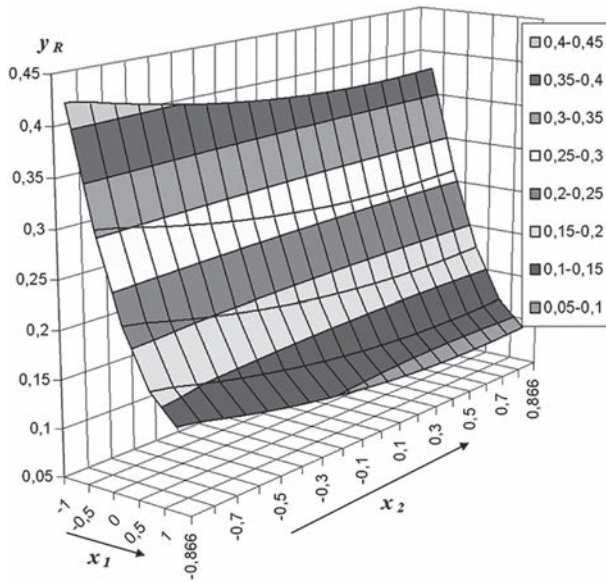


Рисунок 2 — Расчетная зависимость шероховатости поверхности плакированного покрытия от факторов x_1 и x_2
 Figure 2 — Calculated dependence of the surface roughness of cladded coating on factors x_1 and x_2

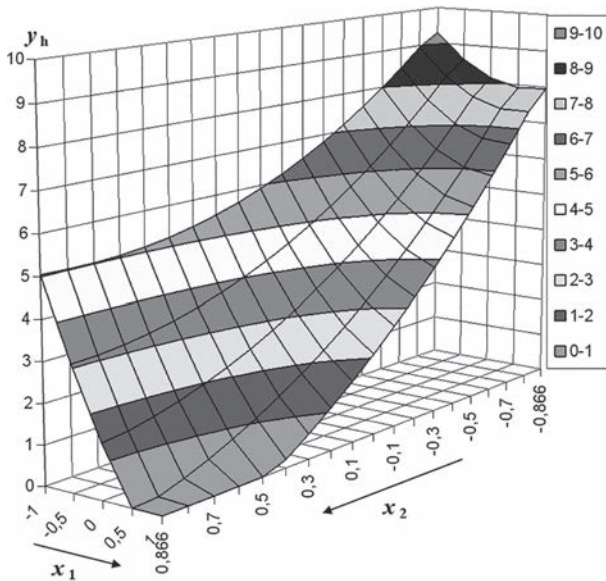


Рисунок 3 — Расчетная зависимость толщины плакированного покрытия от факторов x_1 и x_2
 Figure 3 — Calculated dependence of the cladded coating thickness on the factors x_1 and x_2

Для определения оптимальных технологических режимов полирования, позволяющих обеспечить требуемый класс шероховатости поверхности при сохранении достаточной толщины остаточного плакированного слоя, проанализируем полученные уравнения (2) и (3), перейдя от кодированных обозначений факторов (x_1 и x_2) к соответствующим натуральным обозначениям (n , N) и их величинам. Для наглядности построим несколько графических диаграмм, используя полученные уравнения (2), (3) и изменяя значения натяга N и числа проходов n в пределах установленных интервалов варьирования (рисунки 4 и 5).

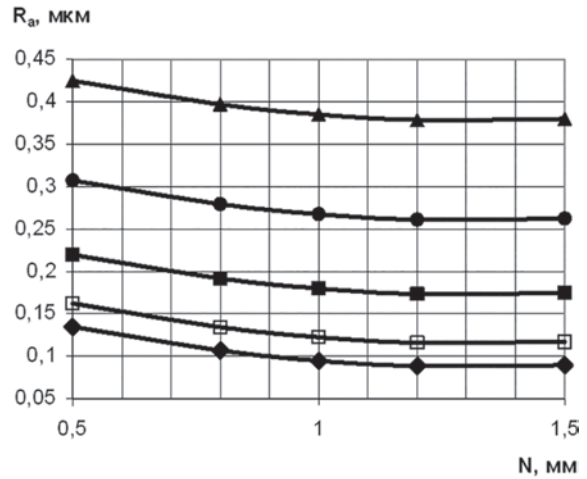
Графические диаграммы, полученные с использованием уравнений (2), (3) и приведенные

на рисунках 4 и 5, позволяют выбрать область технологических режимов полирования, обеспечивающих требуемые в каждом конкретном случае величины шероховатости и толщины покрытия.

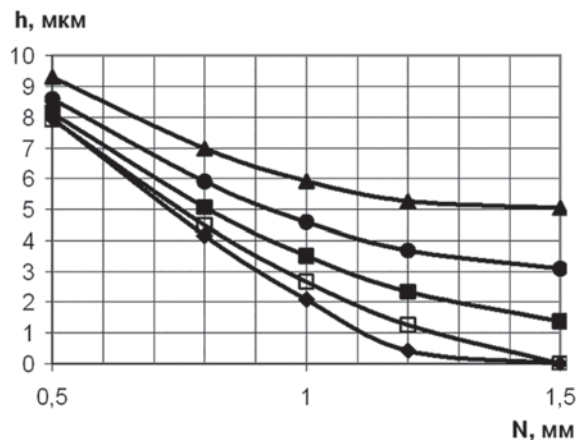
Анализ диаграмм показывает, что в пределах установленных интервалов варьирования факторов увеличение как натяга N , так и числа проходов n приводит к уменьшению параметра шероховатости R_a и толщины покрытия h , однако с различной скоростью.

Так, при постоянном числе проходов увеличение натяга от 0,5 мм до 1,5 мм приводит к снижению шероховатости, но незначительному (см. рисунок 4 а). Причем, чем больше количество проходов, тем меньше разница в снижении шероховатости. В случае с толщиной, наоборот, чем больше количество проходов, тем больше разница в уменьшении толщины (см. рисунок 4 б).

При постоянном натяге с увеличением числа проходов от 3 до 7 и шероховатость, и толщина



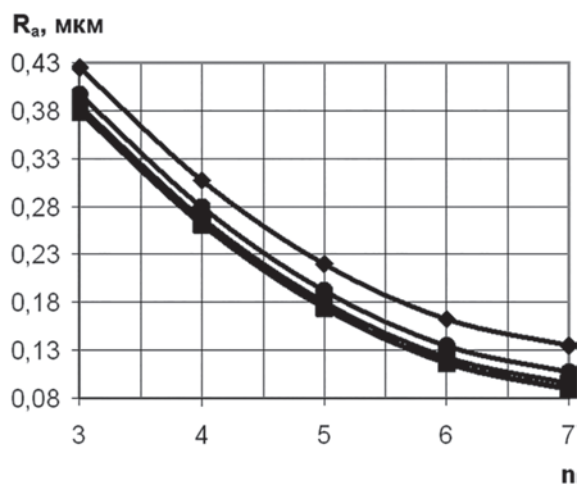
а



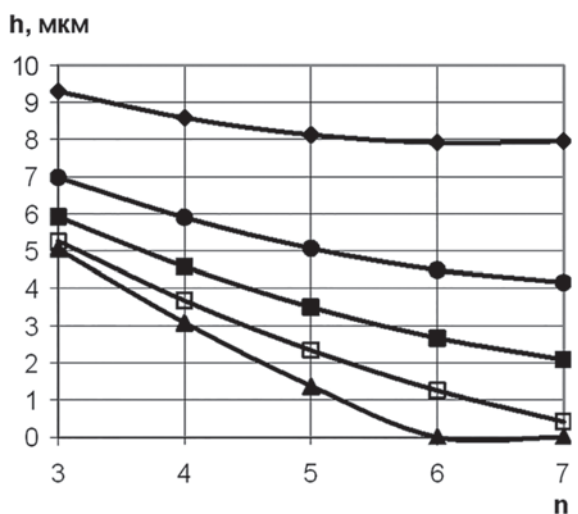
б

Рисунок 4 — Зависимость шероховатости R_a (а) и толщины h (б) плакированного покрытия после полирования от натяга N полировального круга при числе проходов $n = 3, 4, 5, 6, 7$ (сверху вниз)

Figure 4 — Dependence of the roughness R_a (a) and the thickness h (b) of the cladded coating after polishing on the tightness N of the polishing wheel with the number of passes $n = 3, 4, 5, 6, 7$ (from top to bottom)



a



b

Рисунок 5 — Зависимость шероховатости R_a (a) и толщины h (b) плакированного покрытия после полирования от числа проходов n полировального круга при натяге $N = 0,5; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5$ мм (сверху вниз)

Figure 5 – Dependence of the roughness R_a (a) and the thickness h (b) of the cladmed coating after polishing on the number of passes n of the polishing wheel at the tightness $N = 0,5; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5$ mm (from top to bottom)

уменьшаются, однако уменьшение толщины тем значительнее, чем больше количество проходов (см. рисунок 5 a, b).

Определим оптимальные режимы полирования штоков гидроцилиндров, подвергнутых хромированию методом деформационного плакирования гибким инструментом. Параметр шероховатости R_a рабочих поверхностей штоков должен составлять 0,16...0,32 мкм. Из рисунков 4 a и 5 a следует, что такое значение R_a достигается при числе проходов, равном 4 и 5, и при любом значении натяга (в пределах установленного нами интервала варьирования N , равного 0,5...1,5 мм). В этом случае толщина покрытия может лежать в пределах от 1,3 до 8,6 мкм (см. рисунки 4 b и 5 b). Однако следует принять во внимание, что для обеспечения достаточной коррозионной стойкости покрытий их толщина должна быть не менее 5 мкм. Этому условию

удовлетворяют значения натяга, попадающие в диапазон 0,5...0,8 мм. Таким образом, для соответствия требованиям, предъявляемым к штокам гидроцилиндров, полирование рабочей поверхности штоков следует производить при натяге войлочного круга к поверхности, равном 0,5...0,8 мм, в течение времени, соответствующего 4–5 проходам войлочного круга.

По результатам опытной проверки в условиях ОАО «Минский завод автоматических линий имени П.М. Машерова» (Республика Беларусь) установленные технологические режимы полирования были добавлены в технологический процесс хромирования штоков методом ДПГИ, что подтверждает эффективность использования расчетных моделей.

Заключение. В результате экспериментально-статистического моделирования получены зависимости, устанавливающие влияние режимов полирования (число проходов полировального круга, величина натяга круга) на шероховатость и толщину плакированного хромового покрытия.

Анализ полученных зависимостей показывает, что в пределах выбранных интервалов варьирования факторов увеличение натяга полировального круга и числа проходов круга приводит к уменьшению как параметра шероховатости, так и толщины плакированного покрытия, однако с разной степенью интенсивности. На величину шероховатости поверхности плакированного слоя после полирования определяющее влияние оказывает число проходов полировального круга. Влияние режимов полирования на толщину плакированного покрытия носит более сложный характер, так как проявляется как в индивидуальном сопоставимом влиянии обоих факторов, так и в их взаимодействии.

Определены оптимальные режимы полирования штоков гидроцилиндров, подвергнутых хромированию методом ДПГИ. По результатам опытной проверки в условиях ОАО «Минский завод автоматических линий имени П.М. Машерова» установленные технологические режимы полирования были добавлены в технологический процесс хромирования штоков, что подтверждает эффективность использования расчетных зависимостей.

Список литературы

1. Белевский, Л.С. Пластическое деформирование поверхностного слоя и формирование покрытия при нанесении гибким инструментом / Л.С. Белевский. — Магнитогорск: Изд-во Магнитогор. лица РАН, 1996. — 230 с.
2. Анцупов, В.П. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом / В.П. Анцупов. — Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. — 241 с.
3. Belevskii, L.S. Friction nanostructuring treatment of metallic surfaces and deposition of functional coatings using a flexible tool / L.S. Belevskii, I.V. Belevskaya, Yu.Yu. Efimova // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. — 2015. — Vol. 56, No. 3. — Pp. 359–364.
4. Surface Modification of Products by Plastic Deformation and the Application of Functional Coatings / L.S. Belevskii [et al.] // Metallurgist. — 2016. — Vol. 60, No. 3. — Pp. 434–439.

5. Zavalishchin, A.N. Heating Behavior of Aluminum Coatings Obtained in Friction Contact / A.N. Zavalishchin // Metal Science and Heat Treatment. — 2001. — Vol. 43, No. 7. — Pp. 282–285.
6. A new method for production of a copper coating reinforced with nano-diamonds / V.A. Popov [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. — 2007. — Vol. 434. — Pp. 689–692.
7. Manufacturing Technology Improvement of Technology and Equipment for Preparing Steel-Copper Wire / V.I. Kadoshnikov [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. — 2019. — Vol. 55, No. 1. — Pp. 76–83.
8. Study of the Adhesive Properties of a Coating Prepared by Deformation Cladding with a Flexible Tool / M.A. Levantsevich [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. — 2017. — Vol. 52, No. 11. — Pp. 779–784.
9. Формирование на рабочих поверхностях пар смешанного трения функциональных покрытий из цветных металлов и сплавов методом деформационного плакирования с целью повышения их работоспособности / Р.Р. Дема [и др.] // Проблемы черной металлургии и материаловедения. — 2017. — № 3. — С. 43–48.
10. Surface Modification by a Flexible Tool. 1. Plastic Surface Deformation and Simultaneous Coating Application by Rotating Wire Brushes / L.S. Belevskii [et al.] // Russian Engineering Research. — 2020. — Vol. 40, No. 5. — Pp. 390–395.
11. Surface Modification by a Flexible Tool. 2. Practical Use of Coating Application by Rotary Wire Brushes / L.S. Belevskii [et al.] // Russian Engineering Research. — 2020. — Vol. 40, No. 6. — Pp. 476–479.
12. Повышение эксплуатационных характеристик деталей машин нанесением покрытий методом фрикционного плакирования / Р.Р. Дема [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. — 2019. — № 6. — С. 26–35.
13. Study of the Performance of Copper Coatings Formed by Electroplating and Deformation Cladding with a Flexible Tool / V.K. Sheleg [et al.] // Journal of Friction and Wear. — 2018. — Vol. 39, No. 1. — Pp. 6–11.
14. Повышение эксплуатационных характеристик деталей и оборудования методом электрофрикционного плакирования гибким инструментом / Л.С. Белевский [и др.] // Производство проката. — 2018. — № 10. — С. 32–38.
15. Исследование структуры и свойств хромовых покрытий, нанесенных методом электрофрикционного плакирования гибким инструментом / Л.С. Белевский [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2018. — № 10(166). — С. 458–462.
16. Применение планирования эксперимента для выбора оптимальных режимов электродеформационного плакирования гибким инструментом / М.А. Леванцевич [и др.] // Вестн. машиностроения. — 2020. — № 5. — С. 71–76.
17. Белевский, Л.С. Фрикционный и электрофрикционный способы нанесения покрытий / Л.С. Белевский, И.В. Белевская // Обработка сплошных и слоистых материалов. — 2012. — Вып. 38. — С. 158–163.
18. Evaluating the Applicability of Electrodeformation Placing Technology by a Flexible Tool for Chromeing Hydrocilindes / V.K. Sheleg [et al.] // Journal of Friction and Wear. — 2019. — Vol. 40, No. 3. — Pp. 207–212.
19. Особенности фрикционного взаимодействия хромовых покрытий с резиновым контртелом в условиях граничного трения / М.А. Леванцевич [и др.] // Вестн. Полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. — 2019. — № 3. — С. 65–71.
20. Формирование гетерогенных покрытий на основе хрома деформационным плакированием гибким инструментом / М.А. Леванцевич [и др.] // Актуальные проблемы прочности / В.А. Андреев [и др.]; под ред. В.В. Рубаника. — Молодечно: Типография «Победа», 2020. — Гл. 11. — С. 116–132.
21. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. — М.: Машиностроение, 1981. — 184 с.

LEVANTSEVICH Mikhail A., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Leading Researcher¹

E-mail: levancev@mail.ru

MAKSIMCHENKO Natalia N., Ph. D. in Eng.

Leading Researcher¹

E-mail: maksnat2001@mail.ru

PILIPCHUK Yahor V.

Assistant²

E-mail: yahor_pilipchuk@mail.ru

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Received 14 August 2020.

SELECTION OF RATIONAL POLISHING MODES FOR CLADDED CHROME COATINGS

As a result of experimental and statistical modeling, dependencies were obtained that establish the effect of polishing modes (the number of passes of the polishing wheel, the value of the wheel tightness) on the roughness and thickness of the chrome coating obtained by the method of deformation cladding with a flexible tool. It was found that within the selected intervals of variation of the factors, an increase in the tightness of the polishing wheel and the number of passes of the wheel leads to a decrease in both the parameter of the roughness R_a and the thickness of the coating, however, with different degrees of intensity. The number of passes of the polishing wheel has a decisive effect on the value of the surface roughness of the clad layer after polishing. The effect of polishing modes on the thickness of the cladded coating is more complex, since it is demonstrated both in the individual comparable influence of both factors and in their interaction. The optimal modes of polishing of hydraulic cylinder rods subjected to chromium

plating by the method of deformation cladding with a flexible tool have been determined. After the experimental check in the conditions of JSC "Minsk Automated Lines Plant named after P.M. Masherov" (Republic of Belarus), the established technological modes of polishing were added to the technological process of chromium plating of rods. It confirms the effectiveness of using the calculated dependencies.

Keywords: deformation cladding with a flexible tool, coating, hydraulic cylinder rod, chromium plating, polishing, roughness, experiment planning

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-4-53-70-76>

References

- Belevskii L.S. *Plasticheskoe deformirovanie poverkhnostnogo sloya i formirovanie pokrytiya pri nanesenii gibkim instrumentom* [Plastic deformation of the surface layer and formation of the coating when applied with a flexible tool]. Magnitogorsk, Magnitogorskogo litseya RAN Publ., 1996. 230 p. (in Russ.).
- Antsupov V.P. *Teoriya i praktika plakirovaniya izdeliy gibkim instrumentom* [Theory and practice of cladding products with a flexible tool]. Magnitogorsk, Magnitogorskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. G.I. Nosova Publ., 1999. 241 p. (in Russ.).
- Belevskii L.S., Belevskaya I.V., Efimova Yu.Yu. Friction nanostructuring treatment of metallic surfaces and deposition of functional coatings using a flexible tool. *Russian journal of non-ferrous metals*, 2015, vol. 56, no. 3, pp. 359–364.
- Belevskii L.S., Belevskaya I.V., Belov V.K., Gubarev E.V., Efimova Yu.Yu. Surface modification of products by plastic deformation and the application of functional coatings. *Metal-lurgist*, 2016, vol. 60, no. 3, pp. 434–439.
- Zavalishchin A.N. Heating behavior of aluminum coatings obtained in friction contact. *Metal science and heat treatment*, 2001, vol. 43, no. 7, pp. 282–285.
- Popov V.A., Belevsky L.S., Belevskaya E.L., Gordon Ia.M., Tulupov S.A. A new method for production of a copper coating reinforced with nano-diamonds. *Journal of alloys and compounds*, 2007, vol. 434, pp. 689–692.
- Kadoshnikov V.I., Kulikova E.V., Dema R.R., Kharchenko M.V., Androsenko M.V., Latypov O.R. Manufacturing technology improvement of technology and equipment for preparing steel-copper wire. *Chemical and petroleum engineering*, 2019, vol. 55, no. 1, pp. 76–83.
- Levantsevich M.A., Maksimchenko N.N., Belyi A.N., Dema R.R., Kadoshnikov V.I., Nefed'ev S.P., Kharchenko M.V., Amirov R.N., Razumov M.S., Serebrovskii V.I. Study of the adhesive properties of a coating prepared by deformation cladding with a flexible tool. *Chemical and petroleum engineering*, 2017, vol. 52, no. 11, pp. 779–784.
- Dema R.R., Nefedev S.P., Kharchenko M.V., Zotov A.V., Levantsevich M.A., Maksimchenko N.N., Pilipchuk E.V. Formirovanie na rabochikh poverkhnostyakh par smeshannogo treniya funktsionalnykh pokrytiy iz tsvetnykh metallov i splavov metodom deformatsionnogo plakirovaniya s tselyu povysheniya ikh rabotosposobnosti [Formation of functional coatings of non-ferrous metals and alloys on the working surfaces of pairs of mixed friction by the method of deformation cladding in order to increase their performance]. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya*, 2017, no. 3, pp. 43–48 (in Russ.).
- Belevskii L.S., Levantsevich M.A., Dema R.R., Deryabina L.V., Usataya T.V., Latypov O.R. Surface modification by a flexible tool. 1. Plastic surface deformation and simultaneous coating application by rotating wire brushes. *Russian engineering research*, 2020, vol. 40, no. 5, pp. 390–395.
- Belevskii L.S., Levantsevich M.A., Dema R.R., Deryabina L.V., Usataya T.V., Latypov O.R. Surface modification by a flexible tool. 2. Practical use of coating application by rotary wire brushes. *Russian engineering research*, 2020, vol. 40, no. 6, pp. 476–479.
- Dema R.R., Nefed'ev S.P., Kharchenko M.V., Zotov A.V., Levantsevich M.A., Maksimchenko N.N., Sheleg V.K., Pilipchuk E.V. Povysenie ekspluatatsionnykh kharakteristik detaley mashin naneseniem pokrytiy metodom friktsionnogo plakirovaniya [Operating characteristic improving of machine parts by friction cladding]. *Forging and stamping production. Material working by pressure*, 2019, no. 6, pp. 26–35 (in Russ.).
- Sheleg V.K., Levantsevich M.A., Pilipchuk E.V., Dema R.R. Study of the performance of copper coatings formed by electroplating and deformation cladding with a flexible tool. *Journal of friction and wear*, 2018, vol. 39, no. 1, pp. 6–11.
- Belevskii L.S., Levantsevich M.A., Yurut Ye. L., Pilipchuk Ye.V., Dyoma R.R. Povysenie ekspluatatsionnykh kharakteristik detaley i oborudovaniya metodom elektrofriksiionnogo plakirovaniya gibkim instrumentom [Operating characteristic improvement of parts and equipment by method of electric-friction plating with flexible tool]. *Proizvodstvo prokata*, 2018, no. 10, pp. 32–38 (in Russ.).
- Belevsky L.S., Yurut' E.L., Levantsevich M.A., Pilipchuk E.V., Dema R.R. Issledovanie struktury i svoystv khromovykh pokrytiy, nanesennykh metodom elektrofriksiionnogo plakirovaniya gibkim instrumentom [Research of structure and properties of chromic coatings inflicted by electro-friction method by flexible tool]. *Strengthening technologies and coatings*, 2018, no. 10(166), pp. 458–462 (in Russ.).
- Levantsevich M.A., Pilipchuk E.V., Maksimchenko N.N., Belevskii L.S., Dema R.R. Primenenie planirovaniya eksperimenta dlya vybora optimalnykh rezhimov elektrodeformatsionnogo plakirovaniya gibkim instrumentom [Application of experimental design for selection of optimal modes of electrodeformation cladding with a flexible tool]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2020, no. 5, pp. 71–76 (in Russ.).
- Belevskii L.S., Belevskaya I.V. Friksiionny i elektrofriksiionny sposoby naneseniya pokrytiy [Frictional and electrofrictional coating applying methods]. *Processing of solid and laminate materials*, 2012, no. 38, pp. 158–163 (in Russ.).
- Sheleg V.K., Levantsevich M.A., Maksimchenko N.N., Pilipchuk E.V., Yurut E.L., Kalach V.N. Evaluating the applicability of electrodeformation plating technology by a flexible tool for chromeing hydrocylindes. *Journal of friction and wear*, 2019, vol. 40, no. 3, pp. 207–212.
- Levantsevich M.A., Pilipchuk E.V., Kalach V.N., Dudan A.V. Osobennosti friktsionnogo vzaimodeystviya khromovykh pokrytiy s rezinovyim kontrtelom v usloviyakh granichnogo treniya [Features of friction interaction of the chromium coatings with rubber contralor in conditions of boundary friction]. *Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied sciences*, 2019, no. 3, pp. 65–71 (in Russ.).
- Levantsevich M.A., Maksimchenko N.N., Sheleg V.K., Pilipchuk E.V., Kravchuk M.A. Formirovanie geterogennykh pokrytiy na osnove khroma deformatsionnym plakirovaniem gibkim instrumentom [Formation of heterogeneous chromium-based coatings by deformation cladding with a flexible tool]. *Aktualnye problemy prochnosti*, 2020, ch. 11, pp. 116–132 (in Russ.).
- Spiridonov A.A. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* [Planning an experiment in the study of technological processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 184 p. (in Russ.).