

DOI: 10.53078/20778481_2022_4_48

УДК 621.787

В. К. Шелег, А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОГО МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОГО НАКАТЫВАНИЯ

V. K. Sheleg, A. M. Dovgalev, S. A. Sukhotsky

OPTIMIZATION OF PARAMETERS FOR THE PROCESS OF COMBINED MAGNETODYNAMIC ROLLING

Аннотация

Представлены результаты оптимизации параметров процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания внутренней цилиндрической поверхности ферромагнитных деталей. Получены оптимальные значения режимов процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания: частоты вращения комбинированного инструмента и индукции вращающегося магнитного поля, действующей на поверхностный слой ферромагнитной детали. Определен оптимальный диаметр деформирующих шаров комбинированного инструмента, предназначенного для совмещенной отделочно-упрочняющей обработки внутренней цилиндрической поверхности стальных деталей.

Ключевые слова:

оптимизация параметров, отделочно-упрочняющая обработка, деформирующий шар, комбинированный инструмент, вращающиеся магнитные поля, ферромагнитная деталь.

Для цитирования:

Шелег, В. К. Оптимизация параметров процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания / В. К. Шелег, А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 4 (77). – С. 48–56.

Abstract

The paper presents results of optimizing the parameters for the process of combined magnetodynamic rolling of an inner cylindrical surface of ferromagnetic parts. The optimal values for modes of the process of combined magnetodynamic rolling were obtained — the rotational speed of a combined tool and the induction of a rotating magnetic field, which acts on the surface layer of a ferromagnetic part. The optimal diameter for deforming balls of the combined tool designed for combined finishing and hardening treatment of inner cylindrical surfaces of steel parts was determined.

Keywords:

parameter optimization, finishing and hardening treatment, deforming ball, combined tool, rotating magnetic fields, ferromagnetic part.

For citation:

Sheleg, V. K. Optimization of parameters for the process of combined magnetodynamic rolling / V. K. Sheleg, A. M. Dovgalev, S. A. Sukhotsky // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2022. – № 4 (77). – P. 48–56.

Введение

Большинство выходов из строя современных машин и механизмов связа-

но с износом поверхностей входящих в них ответственных деталей. Это делает актуальной задачу разработки и применения новых эффективных технологий

поверхностного упрочнения деталей машин. Особая роль отводится созданию инновационных методов поверхностного пластического деформирования, обеспечивающих комплексное энергетическое воздействие на поверхностный слой ферромагнитных деталей [1]. В Белорусско-Российском университете разработан метод совмещенной отделочно-упрочняющей обработки поверхностей (внутренних, наружных и плоских) ферромагнитных деталей концентрированным потоком энергии вращающегося магнитного поля и динамическим поверхностным пластическим деформированием (далее – метод совмещенного магнитно-динамического накатывания) [2, 3]. Согласно методу на упрочняемую поверхность ферромагнитной детали одновременно воздействуют вращающимся магнитным полем с индукцией $0,10 \dots 1,20$ Тл и колеблющимися деформирующими шарами (получающими энергию от периодически действующего магнитного поля), осуществляющими импульсно-ударное деформирование [4–6].

Комплексное магнитно-силовое воздействие на поверхностный слой ферромагнитной детали позволяет существенно повысить качественные характеристики и эксплуатационные свойства упрочненных поверхностей [7–9].

Однако в настоящее время отсутствуют рекомендации по назначению режимов процесса совмещенной отделочно-упрочняющей обработки вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием. В связи с этим при назначении режимов процесса совмещенной обработки требуется проведение большого объема экспериментальных исследований, дающих возможность установить влияние параметров процесса на качественные характеристики упрочненной поверхности. Это не позволяет устанавливать оптимальные параметры процесса совмещенного упрочнения и сдерживает его внедрение в производство.

Постановка задачи

Учитывая сложившиеся обстоятельства, актуальным является проведение оптимизации параметров процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания внутренних цилиндрических поверхностей ферромагнитных деталей.

Основная часть

При проведении оптимизации совмещенную отделочно-упрочняющую обработку внутренней цилиндрической поверхности колец вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием осуществляли на вертикальном консольно-фрезерном станке с ЧПУ мод. FSS-400CNC с применением комбинированного инструмента [6]. В качестве обрабатываемых деталей использовали кольца из стали 45 ($30 \dots 35$ HRC) с размерами ($D \times d \times l$) $125 \times 110 \times 12$ мм. Поверхность отверстия колец предварительно получали растачиванием с обеспечением шероховатости по параметру Ra $3,2 \dots 3,0$ мкм.

Параметры комбинированного инструмента: диаметр $d_{ш}$ деформирующих шаров – 7, 9, 12, 15, 17 мм; материал деформирующих шаров – ШХ15 ($60 \dots 62$ HRC); материал цилиндрических постоянных магнитов – NdFeB; количество цилиндрических постоянных магнитов, осуществляющих воздействие на деформирующие шары, – 22 шт.; количество цилиндрических постоянных магнитов, осуществляющих намагничивание поверхностного слоя упрочняемых колец, – 32 шт.; материал магнитопроводов – сталь Ст3. В качестве СОЖ использовали масло промышленное 45. Упрочнение внутренней поверхности колец осуществляли на режимах, указанных в табл. 1.

Как показали результаты исследований шероховатости поверхности [10], основными параметрами процесса СМДН, оказывающими наибольшее

влияние на шероховатость обработанной поверхности ферромагнитных деталей, являются частота вращения комбинированного инструмента n , мин^{-1} , диа-

метр деформирующих шаров $d_{ш}$, мм, и величина магнитной индукции B , мТл, действующего на поверхность вращающегося магнитного поля.

Табл. 1. Уровни и интервалы варьирования исследуемых факторов

Фактор	Кодовое обозначение	Интервал варьирования	Натуральный уровень фактора, соответствующий кодированному				
			-1,682	-1	0	+1	+1,682
n – частота вращения, мин^{-1}	x_1	400	3330	3600	4000	4400	4670
$d_{ш}$ – диаметр деформирующих шаров комбинированного инструмента, мм	x_2	3	7	9	12	15	17
B – индукция вращающегося магнита, мТл	x_3	50	46	80	130	180	214

Зависимость шероховатости поверхности деталей $Ra = f(n, d_{ш}, B)$ от основных факторов процесса СМДН аппроксимируем полиномом второй степени.

Так как в процессе проведения эксперимента неизвестно, что ведет к нахождению области оптимума зависимости шероховатости $Ra = f(n, d_{ш}, B)$ – увеличение или уменьшение анализируемого фактора, то целесообразно использовать центральный композиционный план, отвечающий требованию ротатбельности. Такой план позволит получить математическую модель, способную предсказать значение параметра оптимизации с одинаковой точностью независимо от направления изменения фактора. Эксперимент проводили по программе центрального композиционного ротатбельного планирования второго порядка [11, 12].

Центральный композиционный план второго порядка для трех факторов состоит из плана полного факторного эксперимента типа 2^3 (опыты с 1 по 8), шести опытов в «звездных точках» (опыты с 9 по 14) и шести опытов в центре плана (опыты с 15 по 20) [11, 12].

По результатам опытов, выполненных в соответствии с принятым пла-

ном эксперимента, оцениваем коэффициенты уравнения регрессии

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (1)$$

где y – математическое ожидание искомой величины (Ra); $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ – теоретические коэффициенты уравнения регрессии; x_1, x_2, x_3 – кодированные значения факторов ($n, d_{ш}, B$).

Принятые при исследовании уровни и интервалы варьирования факторов процесса СМДН указаны в табл. 1.

Эксперимент по исследованию изменения шероховатости внутренней цилиндрической поверхности колец осуществляли в соответствии с матрицей планирования, представленной в табл. 2. В качестве результатов опытов в таблицу заносились средние арифметические значения пяти измерений шероховатости обработанной поверхности по параметру Ra .

Табл. 2. План и результаты эксперимента по исследованию изменения шероховатости поверхности упрочненных деталей из стали 45 (30...35 HRC)

Опыт	Фактор в кодированных обозначениях			Фактор в натуральном выражении			Примечание	Ra, мкм
	x_1	x_2	x_3	$n, \text{мин}^{-1}$	$d_{ш}, \text{мм}$	$B, \text{мТл}$		
1	+	+	+	4400	15	180	Ядро плана эксперимента	1,94
2	+	+	-	4400	15	80		0,74
3	+	-	+	4400	9	180		1,61
4	+	-	-	4400	9	80		0,69
5	-	+	+	3600	15	180		2,1
6	-	+	-	3600	15	80		0,8
7	-	-	+	3600	9	180		1,72
8	-	-	-	3600	9	80		0,7
9	+1,682	0	0	4670	12	130	Плечо плана эксперимента	0,78
10	-1,682	0	0	3330	12	130		0,86
11	0	+1,682	0	4000	17	130		0,96
12	0	-1,682	0	4000	7	130		0,68
13	0	0	+1,682	4000	12	214		2,71
14	0	0	-1,682	4000	12	46		1,01
15	0	0	0	4000	12	130	Центр плана эксперимента	0,54
16	0	0	0	4000	12	130		0,47
17	0	0	0	4000	12	130		0,56
18	0	0	0	4000	12	130		0,53
19	0	0	0	4000	12	130		0,47
20	0	0	0	4000	12	130		0,49

Теоретические коэффициенты уравнения регрессии $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ определяли по методике [11]. С учетом количества факторов $k = 3$ формулы имеют вид:

$$b_0 = 0,16666 \cdot \sum_{j=1}^{20} y_j - 0,05694 \cdot \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{20} x_{ij} \cdot y_j; \quad (2)$$

$$b_i = 0,07322 \cdot \sum_{j=1}^{20} x_{ij} \cdot y_j; \quad (3)$$

$$b_{ik} = 0,125 \cdot \sum_{j=1}^{20} x_{ij} \cdot x_{kj} \cdot y_j; \quad (4)$$

$$b_{ii} = 0,06254 \cdot \sum_{j=1}^{20} x_{ij}^2 \cdot y_j + 0,00695 \cdot \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{20} x_{ij}^2 \cdot y_j - 0,05694 \cdot \sum_{j=1}^{20} y_j. \quad (5)$$

Используя формулы (2)–(5), найдем коэффициенты уравнения регрессии и подставим их в уравнение (1). Тогда зависимость шероховатости обработанной поверхности по параметру Ra в кодированном виде

$$y = 0,506 - 0,035 \cdot x_1 + 0,097 \cdot x_2 + \\ + 0,534 \cdot x_3 - 0,013 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,025 \times \\ \times x_1 \cdot x_3 + 0,070 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,127 \cdot x_1^2 + \\ + 0,127 \cdot x_2^2 + 0,495 \cdot x_3^2. \quad (6)$$

Перевод натуральных значений в кодированные значения факторов осуществляем по выражениям

$$x_1 = \frac{n - n_0}{\varepsilon_1} = \frac{n - 4000}{400}; \\ x_2 = \frac{d - d_0}{\varepsilon_2} = \frac{d - 12}{3}; \\ x_3 = \frac{B - B_0}{\varepsilon_3} = \frac{B - 130}{50}, \quad (7)$$

где n_0 , d_0 , B_0 – основные уровни факторов в натуральных выражениях; ε_1 , ε_2 , ε_3 – интервалы варьирования факторов.

Перейдем от кодированных значений к натуральным значениям факторов и получим зависимость шероховатости обработанной внутренней цилиндрической поверхности колец по параметру Ra от режимов процесса СМДН и диаметра деформирующих шаров комбинированного инструмента

$$Ra = 16,07 - 5,97 \cdot 10^{-3} \cdot n - 0,324 \cdot d - \\ - 4,14 \cdot 10^{-2} \cdot B - 1,08 \cdot 10^{-5} \cdot n \cdot d - \\ - 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot B + 4,67 \cdot 10^{-4} \cdot d \cdot B + \\ + 0,79 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 1,41 \cdot 10^{-2} \cdot d^2 + \\ + 1,98 \cdot 10^{-4} \cdot B^2. \quad (8)$$

Проверку гипотезы адекватности математической модели проведем с помощью расчетного критерия Фишера [11]

$$F_p = \frac{S_{AD}^2}{S_y^2}, \quad (9)$$

где S_{AD}^2 – дисперсия параметра оптимизации; S_y^2 – дисперсия воспроизводимости эксперимента.

Дисперсию воспроизводимости эксперимента S_y^2 определяем по результатам опытов, проведенных в центре плана.

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_u - y_{cp})^2}{n_0 - 1}, \quad (10)$$

где n_0 – число параллельных опытов в центре плана; y_u – значение параметра оптимизации в u -м опыте; y_{cp} – среднее арифметическое значение параметра оптимизации в n_0 опытах; u – номер параллельного опыта в центре плана.

$$S_y^2 = \frac{0,0074}{6 - 1} = 0,0015.$$

Определяем сумму S_R квадратов отклонений расчетных y_p значений функции отклика от экспериментальных y_i по формуле

$$S_R = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{pi})^2, \quad (11)$$

где y_i – экспериментальное значение параметра оптимизации в i -м опыте; y_{pi} – расчетное значение параметра оптимизации в i -м опыте.

Сумма квадратов отклонений шероховатости от среднего значения (определена расчетом) составила $S_R = 0,0398$.

Определим сумму S_E квадратов отклонений экспериментальных значений y_u функции отклика от среднего значения в центре плана:

$$S_E = \sum_{u=1}^{n_0} (y_u - y_{pu})^2 = 0,0075. \quad (12)$$

Дисперсию параметра оптимизации S_{AD}^2 рассчитываем как

$$S_{AD}^2 = \frac{S_R - S_E}{N - k' - (n_0 - 1)}, \quad (13)$$

где k' – число статистически значимых коэффициентов уравнения регрессии.

$$S_{AD}^2 = \frac{0,0398 - 0,0075}{20 - 10 - (6 - 1)} = 0,0065.$$

Определяем расчетный критерий Фишера:

$$F_p = \frac{0,0065}{0,0015} = 4,3.$$

Так как расчетный критерий Фишера меньше табличного значения ($F_T = 5,1$ [11]) при 5-процентном уровне значимости, то гипотезу адекватности модели принимаем.

Графическое изображение полученной математической модели, показывающее зависимость шероховатости (по параметру Ra) обработанной поверхности детали от двух факторов (при значении третьего, находящегося на основном уровне), представлено на рис. 1–3.

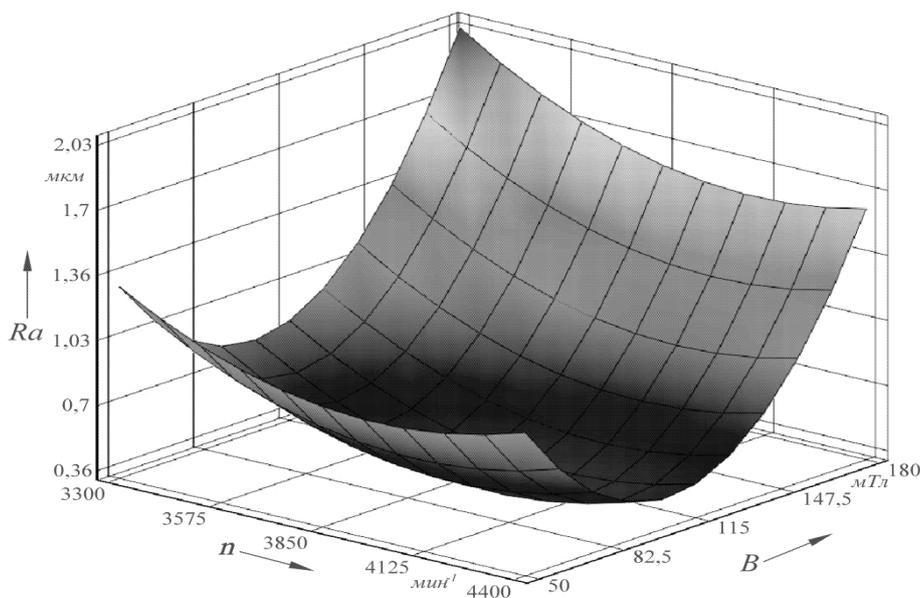


Рис. 1. Влияние индукции B вращающегося магнитного поля, частоты вращения n инструмента и диаметра d_u деформирующих шаров на шероховатость упрочненной поверхности детали из стали 45 (30...35 HRC) ($d_u = 12$ мм)

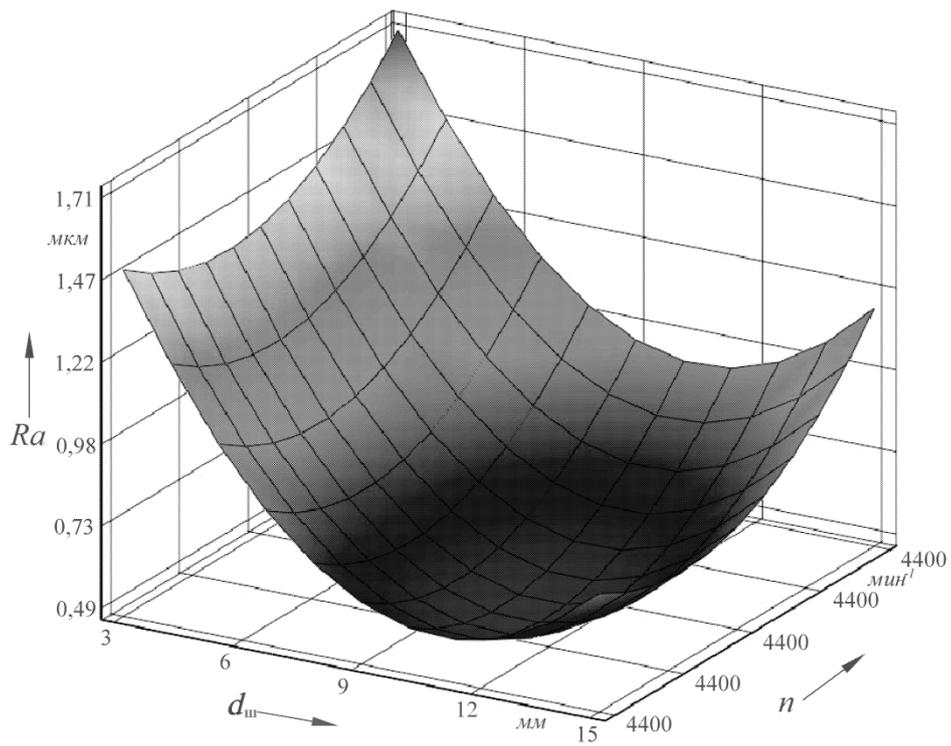


Рис. 2. Влияние диаметра d_m деформирующих шаров и частоты вращения n комбинированного инструмента на шероховатость упрочненной поверхности детали из стали 45 (30...35 HRC) ($B = 130$ мТл)

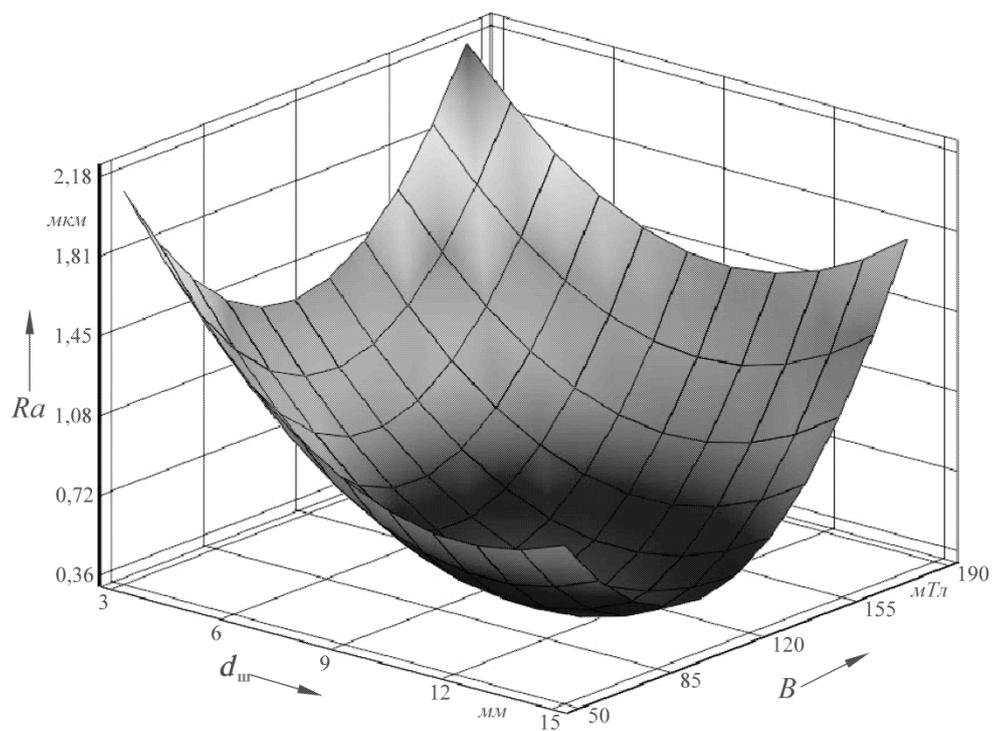


Рис. 3. Влияние диаметра d_m деформирующих шаров и индукции B вращающегося магнитного поля на шероховатость упрочненной поверхности детали из стали 45 (30...35 HRC) ($n = 4000$ min^{-1})

Заключение

Полученные диаграммы (см. рис. 1–3) позволяют определить значения режимов процесса СМДН внутренних цилиндрических поверхностей деталей из стали 45 (30...35 HRC) и диаметр деформирующего шара для обеспечения заданной чертежом шероховатости поверхности. Анализ полученных диаграмм показывает, что оптимальными режимами процесса СМДН внутренней цилиндрической поверхности деталей из

стали 45 (30...35 HRC) являются частота вращения инструмента $n = 4050 \text{ мин}^{-1}$ ($V = 1399 \text{ м/мин}$), индукция действующего на поверхность детали вращающегося магнитного поля $B = 100...105 \text{ мТл}$, при которых обеспечивается снижение исходной шероховатости поверхности с $Ra = 3,2...3,0$ до $0,45...0,36 \text{ мкм}$. Из диаграмм видно, что наибольшее снижение шероховатости обработанной поверхности имеет место при диаметре $d_{ш}$ деформирующих шаров комбинированного инструмента, равном 11,5 мм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Научно-технические технологии в машиностроении / Под ред. А. Г. Сулова. – Москва: Машиностроение, 2012. – 528 с.
2. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. РФ 2068770 / А. М. Довгалев. – Опубл. 10.11.1996.
3. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. РФ 2089373 / А. М. Довгалев. – Опубл. 10.03.1997.
4. Способ и устройство для отделочно-упрочняющей обработки внутренней поверхности отверстия в ферромагнитной детали: пат. ВУ 22193 / В. К. Шелег, А. М. Довгалев, А. А. Жолобов, Д. М. Свирепа, С. А. Сухоцкий, М. В. Мовчан. – Опубл. 30.08.2020.
5. Довгалев, А. М. Магнитно-динамическое и совмещенное накатывание поверхностей нежестких деталей : монография / А. М. Довгалев. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 266 с.
6. Довгалев, А. М. Повышение эффективности упрочнения поверхностей ферромагнитных деталей совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / А. М. Довгалев // Обработка металлов (Технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 18–35.
7. Шелег, В. К. Повышение эффективности процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания / В. К. Шелег, А. М. Довгалев, И. А. Тарадейко // Горная механика и машиностроение. – 2021. – № 3. – С. 1–8.
8. Шелег, В. К. Исследование основных характеристик процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания / В. К. Шелег, А. М. Довгалев, И. А. Тарадейко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 3. – С. 81–89.
9. Шелег, В. К. Получение на поверхности ферромагнитных деталей антифрикционных твердосмазочных покрытий совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / В. К. Шелег, А. М. Довгалев // Актуальные вопросы машиностроения. – 2021. – Вып. 10. – С. 15–21.
10. Шелег, В. К. Влияние параметров процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания на шероховатость поверхности / В. К. Шелег, А. М. Довгалев, И. А. Тарадейко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 1. – С. 71–80.
11. Солонин, Н. С. Математическая статистика в технологии машиностроения / Н. С. Солонин. – Москва: Машиностроение, 1972. – 215 с.
12. Пашкевич, В. М. Научные основы технологии машиностроения. Обработка и анализ экспериментальных данных: учебное пособие / В. М. Пашкевич. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2018. – 236 с.

Статья сдана в редакцию 4 ноября 2022 года

Валерий Константинович Шелег, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. Тел.: +375-296-98-92-64.

Александр Михайлович Довгалеv, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-293-45-40-56. E-mail: rct@bru.by.

Сергей Александрович Сухоцкий, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-295-43-21-50.

Valery Konstantinovich Sheleg, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. Tel.: +375-296-98-92-64.

Aleksandr Mikhailovich Dovgalev, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian Russian University. Tel.: +375-293-45-40-56. E-mail: rct@bru.by.

Sergey Aleksandrovich Sukhotsky, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: +375-295-43-21-50.