

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

УДК 621.787.4:621.789(045)(476)

**В.К. Шелег<sup>1</sup>, А.М. Довгалеv<sup>2</sup>, И.А. Тарадейко<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь<sup>2</sup>Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА  
СОВМЕЩЕННОГО МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОГО НАКАТЫВАНИЯ**

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований шероховатости упрочненных поверхностей от диаметра деформирующих шаров инструмента, исходной шероховатости поверхности заготовок и числа рабочих ходов комбинированного инструмента. Определены оптимальные значения диаметра деформирующих шаров инструмента для обработки методом совмещенного магнитно-динамического накатывания стальных заготовок различной твердости. Установлено, что наибольшая деформация исходных микронеровностей ферромагнитных заготовок осуществляется за первый рабочий ход комбинированного инструмента. Представлены сведения о новом методе совмещенного магнитно-динамического накатывания, позволяющем совместить предварительную и окончательную (финишную) упрочняющие обработки и обеспечить за один рабочий ход инструмента эффективное снижение шероховатости поверхности ферромагнитных заготовок.

**Ключевые слова:** накатывание, деформирующий шар, магнитное поле, шероховатость, комбинированный инструмент, магнитная система, совмещенная упрочняющая обработка, ферромагнитная заготовка.

**V.K. Sheleg<sup>1</sup>, A.M. Dovgalev<sup>2</sup>, I.A. Taradeiko<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus<sup>2</sup>Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus**INCREASING THE EFFICIENCY  
OF THE MAGNETIC DYNAMIC ROLLING PROCESS**

**Abstract.** The article presents the results of studies of the roughness of hardened surfaces on the diameter of the deforming balls of the tool, the initial roughness of the workpiece surface and the number of working strokes of the combined tool. The optimal values of the diameter of the deforming balls of the tool for the processing of the magnetic dynamic rolling process of steel billets of various hardness have been determined. It has been established that the greatest deformation of the initial microroughness of ferromagnetic workpieces occurs during the first working stroke of the combined tool. The information on the new the magnetic dynamic rolling process is presented, which makes it possible to combine preliminary and final (finishing) hardening treatments and to ensure effective reduction of the surface roughness of ferromagnetic workpieces in one working stroke of the tool.

**Keywords:** rolling, deforming ball, magnetic field, roughness, combination tool, magnetic system, combined hardening treatment, ferromagnetic workpiece.

**Введение.** Повышение ресурса работы оборудования, используемого в горнодобывающей отрасли, является важнейшей технологической задачей [1].

Для ее решения повышают долговечность ответственных деталей оборудования, применяя методы поверхностного пластического деформирования [2].

Перспективным является разработанный в последние годы метод совмещенного магнитно-динамического накатывания (СМДН), обеспечивающий комплексное энергетическое воздействие на поверхностный слой ферромагнитных деталей. Согласно методу СМДН на поверхность ферромагнитной детали одновременно воздействуют вращающимся магнитным полем и колеблющимися деформирующими шарами, осуществляющими импульсно-ударное деформирование [3-6]. СМДН позволяет формировать требуемый микрорельеф поверхности и обеспечивать получение на ферромагнитной детали антифрикционного наноструктурированного поверхностного слоя, обладающего высокими эксплуатационными свойствами [7].

Однако в настоящее время отсутствуют исследования зависимости шероховатости упрочняемой поверхности от диаметра деформирующих шаров инструмента, исходной шероховатости поверхности заготовок и числа рабочих ходов инструмента. Это не позволяет устанавливать рациональные параметры инструмента и режимы процесса СМДН, осуществлять прогнозирование шероховатости обработанной поверхности, что сдерживает внедрение метода в производство.

**Постановка задачи.** Учитывая новизну разработанного метода СМДН, важно оценить влияние диаметра деформирующих шаров инструмента, исходной шероховатости поверхности заготовок и числа рабочих ходов инструмента на шероховатость обработанной поверхности, во многом определяющей ее качественные и эксплуатационные свойства. Полученные результаты исследований будут являться базой для разработки новых эффективных методов отделочно-упрочняющей обработки, позволят специалистам назначать рациональные режимы процесса СМДН и будут способствовать внедрению метода на предприятиях машиностроения.

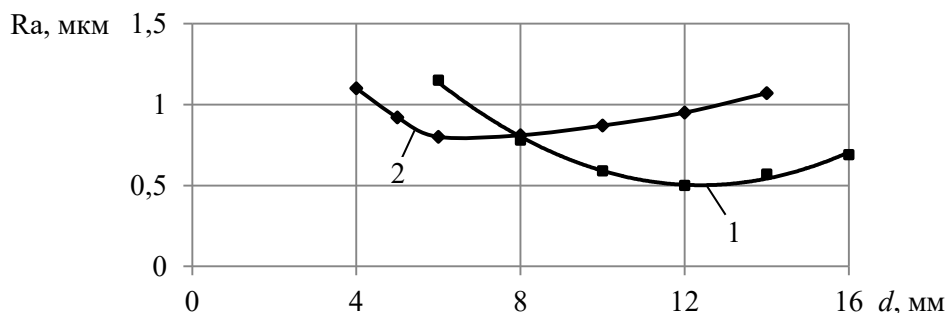
**Основная часть.** Шероховатость поверхностей упрочняемых заготовок измеряли на профилометре – профилографе SurfTest SJ-210 фирмы Mitutoyo (Япония). Погрешность измерений не превышала 5 %. Измерение шероховатости поверхности заготовок выполняли на одной настройке прибора и температуре окружающей среды 18-20 °С. За величину шероховатости упрочненной поверхности заготовки принимали среднее значение пяти измерений. На каждом из исследуемых параметров процесса СМДН обрабатывали пять заготовок.

Совмещенную отделочно-упрочняющую обработку внутренней цилиндрической поверхности заготовок осуществляли на фрезерном станке с ЧПУ мод. FSS-400. В качестве обрабатываемых заготовок использовали кольца из стали 45, 40Х и серого чугуна СЧ20 соответствующей твердости с размерами ( $D \times d \times l$ ) – 125×110×12 мм. Отверстия заготовок предварительно растачивали в размер  $\varnothing 110H8$  с обеспечением соответствующей шероховатости.

Параметры комбинированного инструмента: диаметр деформирующих шаров – 12 мм; материал деформирующих шаров – ШХ 15(62-65HRC); материал цилиндрических постоянных магнитов NdFeB; размер цилиндрических постоянных магнитов ( $D \times h$ ) – 15×5 мм; количество магнитов, осуществляющих воздействие на деформирующие шары – 22 шт.; количество цилиндрических постоянных магнитов, осуществляющих намагничивание поверхностного слоя упрочняемых колец – 32 шт.; материал магнитопроводов – сталь Ст 3.

Режимы СМДН: частота вращения инструмента  $n = 1600-4500 \text{ мин}^{-1}$  (окружная скорость инструмента – 552,6-1554,3 м/мин); осевая подача инструмента  $S = 20-160 \text{ мм/мин}$ ; индукция вращающегося магнитного поля, действующего на упрочняющую поверхность заготовки,  $B_{\text{дет}} = 0,130 \text{ Тл}$ ; индукция магнитной системы инструмента  $B_{\text{мс}} = 0,350 \text{ Тл}$ ; количество рабочих ходов инструмента – один; смазочно-охлаждающая жидкость – масло индустриальное 45.

**Исследование шероховатости поверхности от диаметра деформирующих шаров инструмента.** На рисунке 1 представлены зависимости шероховатости поверхности заготовок от диаметра деформирующих шаров комбинированного инструмента.

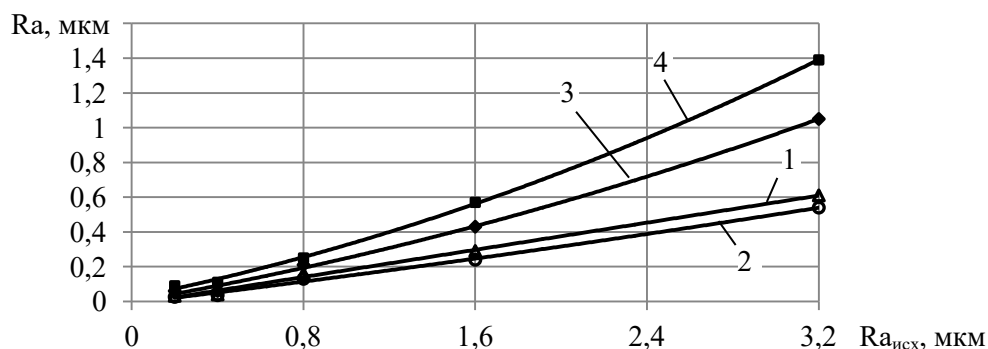


материал упрочняемых колец: 1 – сталь 45 (190-200 НВ); 2 – сталь 45 (30-35 HRC)  
**Рисунок 1.** – Зависимость шероховатости поверхности от диаметра  $d$  деформирующих шаров комбинированного инструмента при следующих условиях процесса СМДН:  
 $Ra_{исх} = 5,8-6,0$  мкм;  $B_{дет} = 0,130$  Тл;  $n = 3150$  мин<sup>-1</sup>;  $S = 20$  мм/мин

Из рисунка 1 видно, что оптимальными значениями диаметров деформирующих шаров для упрочнения СМДН заготовок являются: для стали 45 (190-200 НВ) – 12 мм; для стали 45 (30-35 HRC) – 6 мм. При этом обеспечивается минимальная шероховатость поверхности по параметру Ra – 0,5 и 0,8 мкм соответственно.

С дальнейшим увеличением диаметра шаров комбинированного инструмента шероховатость упрочняемой поверхности начинает возрастать. Это связано с увеличением площади контакта деформирующих шаров с заготовкой и уменьшением величины удельного давления. Кроме того, снижаются характеристики колебаний деформирующих шаров вследствие изменения их силового взаимодействия с магнитной системой инструмента.

**Исследование шероховатости обработанной поверхности от исходной шероховатости упрочняемых заготовок.** На рисунке 2 представлены зависимости шероховатости обработанной поверхности от исходной шероховатости поверхности заготовок при упрочнении СМДН.



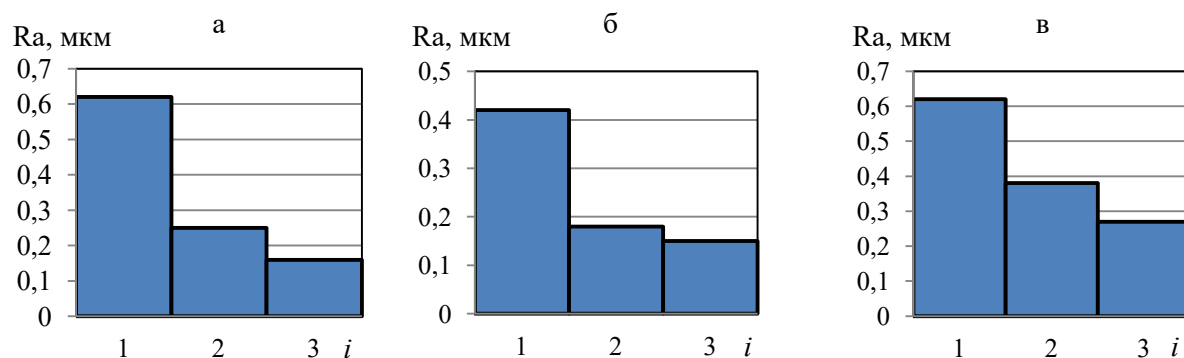
1 – сталь 45 (190-200 НВ); 2 – сталь 40X (180-190 НВ);  
 3 – сталь 45 (30-35 HRC); 4 – сталь 45 (40-45 HRC)  
**Рисунок 2.** – Влияние исходной шероховатости поверхности заготовок на шероховатость поверхности после СМДН:  $S = 20$  мм/мин;  $d = 12$  мм;  $n = 3150$  мин<sup>-1</sup>;  $B_{дет} = 0,130$  Тл

Анализ результатов исследований показал, что СМДН при высокой исходной шероховатости поверхности заготовки  $Ra_{исх} = 3,0-3,2$  мкм, полученной чистовым рас-

тачиванием, обеспечивает снижение шероховатости в 5,3 раза (с Ra 3,20 до 0,60 мкм) для заготовок из стали 45 (190-200 HB) и в 5,7 раза (с Ra 3,20 до 0,56 мкм) для заготовок из стали 40X (180-190 HB), в 3,0 раза (с Ra 3,20 до 1,03 мкм) для стали 45 (30-35 HRC), в 2,3 раза (с Ra 3,20 до 1,40 мкм) для стали 45 (40-45 HRC).

Имеющиеся на рисунке 2 зависимости позволяют оценить технологические возможности метода СМДН и осуществить прогнозирование высоты микронеровностей поверхностей упрочняемых ферромагнитных заготовок с учетом их исходной шероховатости.

**Исследование шероховатости поверхности от числа рабочих ходов комбинированного инструмента.** На рисунке 3 представлены диаграммы изменения величины шероховатости внутренней поверхности колец из указанных материалов, обработанных лезвийным инструментом (расточиванием) и упрочненных СМДН.



**а – сталь 45 (190-200 HB), условия осуществления процесса СМДН:**

$Ra_{исх} = 5,2-5,7$  мкм;  $d = 12$  мм;  $B_{дет} = 0,130$  Тл;  $n = 3150$  мин<sup>-1</sup>;  $S = 20$  мм/мин;

**б – сталь 40X (180-190 HB), условия осуществления процесса СМДН:**

$Ra_{исх} = 5,5-6,0$  мкм;  $d = 12$  мм;  $B_{дет} = 0,130$  Тл;  $n = 3150$  мин<sup>-1</sup>;  $S = 20$  мм/мин;

**в – серый чугун СЧ20 (150-160 HB), условия осуществления процесса СМДН:**

$Ra_{исх} 5,8-6,0$  мкм;  $d = 12$  мм;  $B_{дет} = 0,130$  Тл;  $n = 2240$  мин<sup>-1</sup>;  $S = 20$  мм/мин

**Рисунок 3. – Диаграммы изменения величины шероховатости внутренней поверхности колец от количества рабочих ходов  $i$  инструмента**

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил установить следующее:

- при обработке колец из стали 45 (190-200 HB) за первый рабочий ход инструмента исходная шероховатость поверхности снижается в 9,2 раза, а с учетом второго – в 22,8 раза, третьего – в 35,5 раз (по отношению к исходной);

- при обработке колец из стали 40X (180-190 HB) за первый рабочий ход инструмента исходная шероховатость поверхности снижается в 13,9 раза, а с учетом второго – в 33,3 раза, третьего – в 40,0 раз;

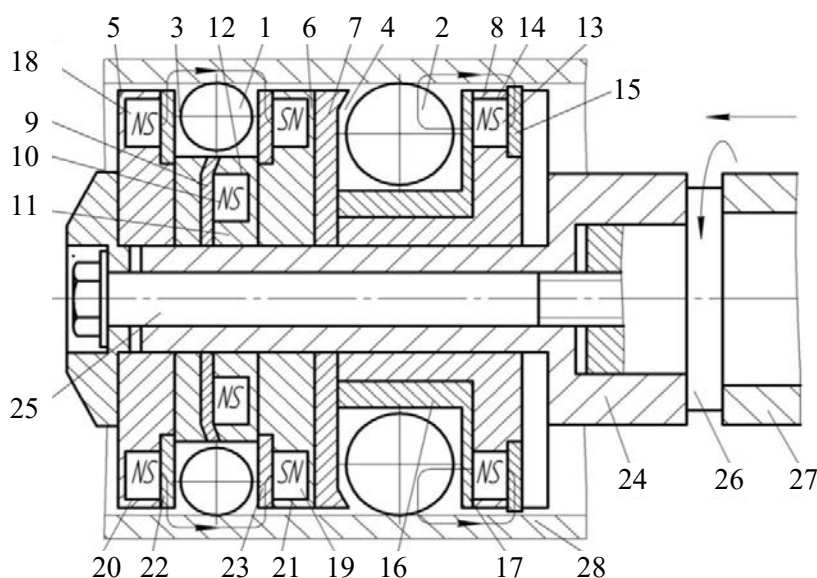
- при обработке колец из серого чугуна СЧ20 (150-160 HB) обеспечивается снижение исходной шероховатости за первый рабочий ход в 9,5 раза, за второй – в 15,1 раз, третий – в 20,7 раз.

Установлено, что наибольшее деформирование исходных микронеровностей заготовок осуществляется за первый рабочий ход инструмента.

Представленные на рисунке 3 диаграммы снижения высоты шероховатости поверхности ферромагнитных заготовок в зависимости от количества рабочих ходов инструмента указывают на перспективность разработки конструкции многорядного комбинированного инструмента для СМДН, кольцевые камеры с деформирующими шарами которого смещены в осевом направлении.

**Разработка метода СМДН и инструмента, обеспечивающих повышение эффективности снижения шероховатости.** Повышение эффективности снижения исходной шероховатости внутренней цилиндрической поверхности ферромагнитных заготовок обеспечивает разработанный метод СМДН, в соответствии с которым последовательно осуществляют предварительную и окончательную упрочняющую обработки за один рабочий ход комбинированного инструмента. Предварительную (черновую) упрочняющую обработку осуществляют вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием шарами малого диаметра, которым сообщают радиальные колебания. Окончательную (финишную) упрочняющую обработку проводят вращающимся магнитным полем и поверхностным пластическим деформированием, выполняемым шарами большего диаметра и с меньшей шероховатостью их сферической поверхности [8].

Для реализации предложенного метода СМДН и объединения предварительной и окончательной упрочняющих обработок в один технологический переход (одну операцию) спроектирован двухрядный комбинированный инструмент, изображенный на рисунке 4.



1, 2 – деформирующие шары; 3, 4 – кольцевые камеры; 5-8 – диски; 9 – зубчатый магнитопровод; 10, 13, 18, 19 – цилиндрические постоянные магниты; 11 – держатель; 12, 14, 20, 21 – аксиальные отверстия; 15 – магнитопроводная шайба; 16 – стакан; 17 – фланец; 22, 23 – кольцевые магнитопроводы; 24 – втулка; 25 – винт; 26 – оправка; 27 – шпиндель; 28 – ферромагнитная заготовка

**Рисунок 4. – Двухрядный комбинированный инструмент для СМДН внутренних цилиндрических поверхностей**

Комбинированный инструмент содержит два ряда деформирующих шаров 1, 2, смещенных в осевом направлении и установленных в кольцевых камерах 3, 4, образованных дисками 5, 6 и 7, 8 соответственно. Диаметр деформирующих шаров 1 существенно меньше диаметра деформирующих шаров 2. Кроме того, точность изготовления применяемых деформирующих шаров 2 на 1-2 класса выше. При этом деформирующие шары 2 имеют более низкую шероховатость сферической поверхности. Радиальные колебания деформирующим шарам 1 относительно упрочняемой поверхности сообщает магнитная система, имеющая: зубчатый магнитопровод 9; постоянные цилиндрические магниты 10; держатель 11 с равномерно расположенными аксиальными отверстиями 12.

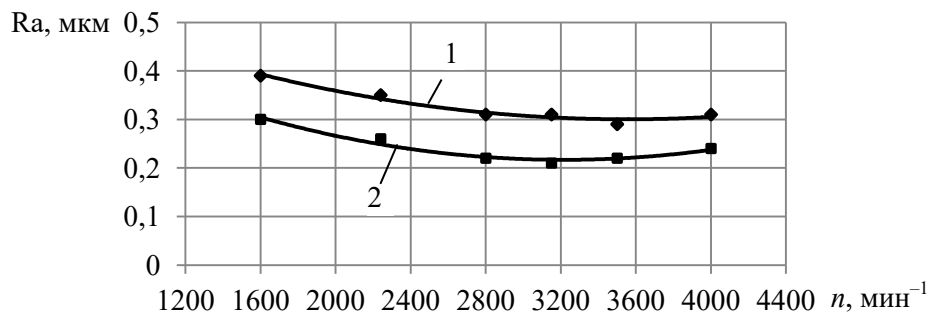
Для вращения деформирующих шаров 2 относительно продольной оси внутренней цилиндрической поверхности ферромагнитной заготовки предназначена магнитная система, в состав которой входят цилиндрические постоянные магниты 13, установленные в аксиальных отверстиях 14 диска 8, и кольцевая магнитопроводная шайба 15. В кольцевой камере 4 установлен стакан 16 с фланцем 17, исключая механическое взаимодействие деформирующих шаров 2 с цилиндрическими постоянными магнитами 13.

Для одновременного воздействия на цилиндрическую поверхность ферромагнитной заготовки вращающимся магнитным полем предназначена система, состоящая из цилиндрических постоянных магнитов 18, 19, установленных в аксиальных отверстиях 20, 21 дисков 5, 6, и кольцевых магнитопроводов 22, 23. Диски 5-8, зубчатый магнитопровод 9, держатель 11 установлены соосно на втулке 24, закрепленной винтом 25 на оправке 26. Диски 5-8, держатель 11, стакан 16 с фланцем 17, втулка 24 изготовлены из немагнитопроводных материалов.

Оправку 26 инструмента закрепляют в шпинделе 27 станка. Инструмент вводят в цилиндрическое отверстие упрочняемой ферромагнитной заготовки 28, сообщают ему вращение и перемещают с осевой подачей. В процессе совмещенной упрочняющей обработки деформирующие шары 1 (вследствие периодического действия вращающегося магнитного поля) осуществляют радиальные колебания и наносят динамические удары по упрочняемой поверхности, максимально деформируя исходные микронеровности. Затем обработанную поверхность заготовки 28 окончательно упрочняют деформирующие шары 2 и вращающееся магнитное поле, создаваемое цилиндрическими постоянными магнитами 13. Деформирующие шары 2 (в силу конструкции магнитной системы) прижимаются к цилиндрической поверхности заготовки, выполняют тангенциальные колебательные движения и осуществляют окончательное сглаживание оставшихся микронеровностей. Низкая шероховатость сферической поверхности деформирующих шаров 2 способствуют эффективному сглаживанию микронеровностей заготовки.

Предложенный метод СМДН и комбинированный инструмент для его осуществления позволяют за один технологический переход (одну операцию) выполнить предварительное и окончательное поверхностное пластическое деформирование и, тем самым, обеспечить максимальную степень деформации исходных микронеровностей поверхности ферромагнитной заготовки.

На рисунке 5 изображены графики зависимости шероховатости поверхности от частоты вращения инструмента при упрочнении по разработанному методу СМДН. Реализацию метода СМДН осуществляли на режимах, указанных ранее.



1 – сталь 45 (190-200 НВ); 2 – сталь 40X (180-190 НВ)

Рисунок 5. – Зависимость шероховатости поверхности от частоты вращения комбинированного инструмента, обеспечивающего совмещение предварительного и окончательного (финишного) упрочнения:

$R_{a_{исх}} = 5,8-6,0$  мкм;  $S = 20$  мм/мин;  $d_1 = 12$  мм;  $d_2 = 20$  мм;  $B_{дет} = 0,130$  Тл

Параметры комбинированного инструмента: диаметр деформирующих шаров, осуществляющих предварительное поверхностное пластическое деформирование, составлял 12 мм ( $Ra$  0,10 мкм), а осуществляющих окончательное деформирование – 20 мм ( $Ra$  0,06 мкм). Максимальная индукция магнитного поля, создаваемого магнитной системой инструмента и действующего на деформирующие шары, составляла 0,350 Тл.

Таким образом, разработанный метод СМДН позволяет за один рабочий ход комбинированного инструмента (в зависимости от частоты его вращения) снизить исходную шероховатость поверхности стальных заготовок твердостью 190-200 НВ с  $Ra = 5,8-6,0$  мкм до  $Ra = 0,2-0,3$  мкм, что указывает на его высокую эффективность.

**Заключение.** Определены оптимальные диаметры деформирующих шаров комбинированного инструмента для СМДН при обработке поверхностей заготовок: из стали 45 (190-200 НВ) – 12 мм; из стали 45 (30-35 HRC) – 6 мм.

Получены зависимости влияния исходной шероховатости поверхности стальных заготовок различной твердости на шероховатость упрочненной поверхности, позволяющие оценить технологические возможности метода СМДН и осуществить прогнозирование высоты микронеровностей поверхностей обрабатываемых ферромагнитных заготовок.

Выявлено, что при обработке СМДН нежестких колец: из стали 45 (190-200 НВ) за первый рабочий ход инструмента исходная шероховатость поверхности  $Ra_{исх} = 5,2-5,7$  мкм снижается в 9,2 раза, с учетом второго – в 22,8 раза, третьего – в 35,5 раз (до  $Ra = 0,15-0,16$  мкм); из стали 40Х (180-190 НВ) за первый рабочий ход инструмента исходная шероховатость поверхности с  $Ra_{исх} = 5,5-6,0$  мкм снижается в 13,9 раз, с учетом второго – в 33,3 раза, третьего – в 40,0 раз (до  $Ra = 0,14-0,15$  мкм); из серого чугуна СЧ20 (150-160 НВ) за первый рабочий ход инструмента исходная шероховатость поверхности с  $Ra_{исх} = 5,8-6,0$  мкм снижается в 9,5 раза, за второй – в 15,1 раз, за третий – в 20,7 раз (до  $Ra = 0,28-0,29$  мкм).

Установлено, что наибольшая деформация исходных микронеровностей ферромагнитных заготовок осуществляется за первый рабочий ход комбинированного инструмента.

Разработан метод СМДН, позволяющий совместить предварительную и окончательную (финишную) упрочняющие обработки и обеспечить за один рабочий ход инструмента эффективное снижение исходной шероховатости поверхности заготовок из сталей твердостью 190-200 НВ с  $Ra_{исх} = 5,8-6,0$  до 0,2-0,3 мкм. Для реализации предложенного метода СМДН спроектирован двухрядный комбинированный инструмент, кольцевые камеры с деформирующими шарами которого смещены в осевом направлении, диаметр деформирующих шаров возрастает от первой камеры к последующей, магнитная система первой кольцевой камеры обеспечивает радиальные, а второй – тангенциальные колебания деформирующих шаров.

#### Список использованных источников

1. Дидык, Р.П. Проблемы и перспективы горного машиностроения / Р.П. Дидык // Горный журнал. – 1999. – № 6. – С. 16-17.
2. Технологические основы финишной упрочняющей пневмовибродинамической обработки нежестких деталей в машиностроении / А.П. Минаков [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – 251 с.

3. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. 2068770 РФ, МКИ 6В24В39/02 / А.М. Довгалеv; заявитель А.М. Довгалеv. – № 4922542/27; заявл. 29.03.91; опубл. 10.11.96 // Бюл. № 31. – 7 с.

4. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. 2089373 РФ, МКИ 6В24В39/02 / А.М. Довгалеv; заявитель А.М. Довгалеv. – № 4924841/02; заявл. 05.04.91; опубл. 10.09.97 // Бюл. № 25. – 7 с.

5. Довгалеv, А.М. Повышение эффективности упрочнения поверхностей ферромагнитных деталей совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / А.М. Довгалеv // Обработка металлов (Технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 18-35.

6. Довгалеv, А.М. Магнитно-динамическое и совмещенное накатывание поверхностей нежестких деталей / А.М. Довгалеv. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2017. – 266 с.

7. Шелег, В.К. Исследование триботехнических свойств поверхностей деталей, упрочненных совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / В.К. Шелег, А.М. Довгалеv // Актуальные вопросы машиноведения. – 2018. – Т. 7. – С. 330-334.

8. Довгалеv, А.М. Повышение эффективности совмещенного магнитно-динамического накатывания поверхностей ферромагнитных деталей / А.М. Довгалеv // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч. техн. конф., Могилев, 26-27 апр. 2018 г. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2018. – С. 28.

#### Информация об авторах

*Валерий Константинович Шелег* – Член-корреспондент НАН Беларуси, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь), e-mail: sheleh\_v@tut.by.

*Александр Михайлович Довгалеv* – кандидат технических наук, доцент, декан факультета довузовской подготовки и профориентации, Белорусско-Российский университет (пр. Мира, 43, 212005, г. Могилев, Беларусь), e-mail: bru@bru.by.

*Иван Анатольевич Тарадейко* – ассистент, Белорусско-Российский университет (пр. Мира, 43, 212005, г. Могилев, Беларусь), e-mail: IvanTaradeiko@yandex.ru.

#### Information about the authors

*Valery Konstantinovich Sheleg* – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor, D. Sc. (Engineering), Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Belarus), e-mail: sheleh\_v@tut.by.

*Aleksandr Mikhailovich Dovgalev* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of pre-university education and professional orientation Faculty, Belarusian-Russian University (43, Mira Ave., 212005, Mogilev, Belarus), e-mail: bru@bru.by.

*Ivan Anatolievich Taradeiko* – assistant, Belarusian-Russian University (43, Mira Ave., 212005, Mogilev, Belarus), e-mail: IvanTaradeiko@yandex.ru.

Поступила в редакцию 12.03.2021 г.