
УДК 621:787

В. К. Шелег, А. М. Довгалев, И. А. Тарадейко

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ НЕЖЕСТКИХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ
ДЕТАЛЕЙ СОВМЕЩЕННЫМ МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКИМ
НАКАТЫВАНИЕМ**

UDC 621:787

V. K. Sheleg, A. M. Dovgalev, I. A. Taradeiko

**INCREASING THE ACCURACY OF NON-RIGID FERROMAGNETIC PARTS
PROCESSING BY USING COMBINED MAGNETODYNAMIC ROLLING**

Аннотация

В работе приведены результаты исследований точности обработки нежестких ферромагнитных деталей при совмещенном магнитно-динамическом накатывании. Определены диапазон изменения диаметрального размера отверстия стальных заготовок, упрочненных совмещенным магнитно-динамическим накатыванием, и качество точности диаметрального размера. Установлено повышение точности формы поперечного сечения тонкостенных ферромагнитных заготовок. Впервые представлен разработанный авторами метод совмещенного магнитно-динамического накатывания, обеспечивающий повышение размерной точности.

Ключевые слова:

накатывание, деформирующий шар, комбинированный инструмент, постоянный магнит, размерная точность, нежесткая деталь, форма поперечного сечения, шероховатость, поле рассеивания диаметрального размера.

Abstract

The paper presents the results of research into the accuracy of processing non-rigid ferromagnetic parts using combined magnetodynamic rolling. The range of variation in the diametric size of holes in steel blanks hardened by combined magnetodynamic rolling has been determined, as well as the accuracy quality of the diametric size. An increase in the accuracy of cross-sectional shape of thin-walled ferromagnetic workpieces has been established. The method of combined magnetodynamic rolling, which provides an increase in dimensional accuracy, is presented by the authors for the first time.

Keywords:

rolling, deforming ball, combination tool, permanent magnet, dimensional accuracy, non-rigid part, cross-sectional shape, roughness, scattering field of diameter size.

Введение

Повышение точностных и качественных характеристик изготавливаемых нежестких деталей машин является важной технологической задачей, решение которой обеспечивает увеличение долговечности создаваемых современных технических систем [1].

В машиностроении размерную и

геометрическую точность нежестких ферромагнитных деталей (далее – деталей) обеспечивают методами механической обработки, предусматривающими снятие с их поверхности слоя металла (припуска на обработку). К таким методам относятся точение, шлифование, хонингование, суперфиниширование, магнитно-абразивное полирование и др.

Качественные же характеристики

поверхностного слоя деталей обеспечивают на финишных операциях технологического процесса, применяя, как правило, статические и динамические методы поверхностного пластического деформирования [2, 3].

В последние годы в связи с активным развитием высокоточных технологий и размерной нанобработки, требующих изменения размеров заготовок от нескольких микрометров до нанометров, возрос интерес к методам поверхностного пластического деформирования, которые, наряду с высокими качественными и эксплуатационными свойствами поверхности деталей, повышают размерную и геометрическую точность [4].

К числу таких методов относится и совмещенное магнитно-динамическое накатывание (СМДН), при котором на поверхностный слой ферромагнитной детали одновременно воздействуют вращающимся магнитным полем и колеблющимися деформирующими шарами, осуществляющими импульсно-ударное деформирование [5–7].

Метод СМДН позволяет получить на детали антифрикционный наноструктурированный поверхностный слой, характеризующийся высокими качественными и эксплуатационными свойствами [8, 9].

Анализ литературных источников показывает, что в настоящее время отсутствуют сведения о точностных возможностях разработанного метода СМДН, что сдерживает его применение в производстве при изготовлении высокоточных деталей. В связи с этим проведение исследований точности обработки деталей при СМДН является своевременной и актуальной задачей.

Изменение диаметрального размера внутренней поверхности нежестких ферромагнитных втулок

При проведении исследований точности обработки внутреннюю по-

верхность нежестких ферромагнитных втулок (далее – втулок) упрочняли СМДН на фрезерном станке с ЧПУ мод. FSS-400 с применением специального комбинированного инструмента.

В качестве заготовок использовали втулки с размерами ($D \times d \times h$) – $125 \times 110 \times 40$ мм, материал втулок – сталь 45 различной твердости.

Отверстия втулок предварительно растачивали в размер $\varnothing 110H8^{+0,054}$ мм на станке 16К20Ф3. Режимы растачивания: $V = 108$ м/мин; $S = 0,15$ мм/об; $t = 0,25$ мм. Материал режущей части инструмента – Т15К6. Шероховатость внутренней поверхности втулок после растачивания $Ra = 3,0 \dots 3,2$ мкм.

Параметры применяемого комбинированного инструмента: диаметр деформирующих шаров – 12 мм; материал деформирующих шаров – ШХ 15 (62...65 HRC); материал цилиндрических постоянных магнитов – Nd Fe B; размер применяемых цилиндрических 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 втулок, – 32 шт.; материал магнитопроводов – сталь Ст 3.

Режимы процесса СМДН: частота вращения инструмента ($1600 \dots 4000$ мин⁻¹); осевая подача инструмента – 40 мм/мин; величина индукции магнитного поля, действующего на деформирующие шары, – 0,350 Тл; величина индукции вращающегося магнитного поля, действующего на поверхность втулки, – 0,130...0,135 Тл; радиальный зазор между упрочняемой поверхностью нежесткой втулки и кольцевыми магнитопроводами инструмента – 0,3 мм; количество рабочих ходов инструмента – один; смазочно-охлаждающая жидкость – масло индустриальное 45.

Базирование втулок осуществляли в специальном технологическом приспособлении, установленном на столе

станка и обеспечивающем приложении усилия закрепления в их торец.

Изменение диаметрального размера ΔD втулок определяли на основе

сравнения профилограмм исходной и упрочненной СМДН поверхности. Результаты исследований представлены на рис. 1.

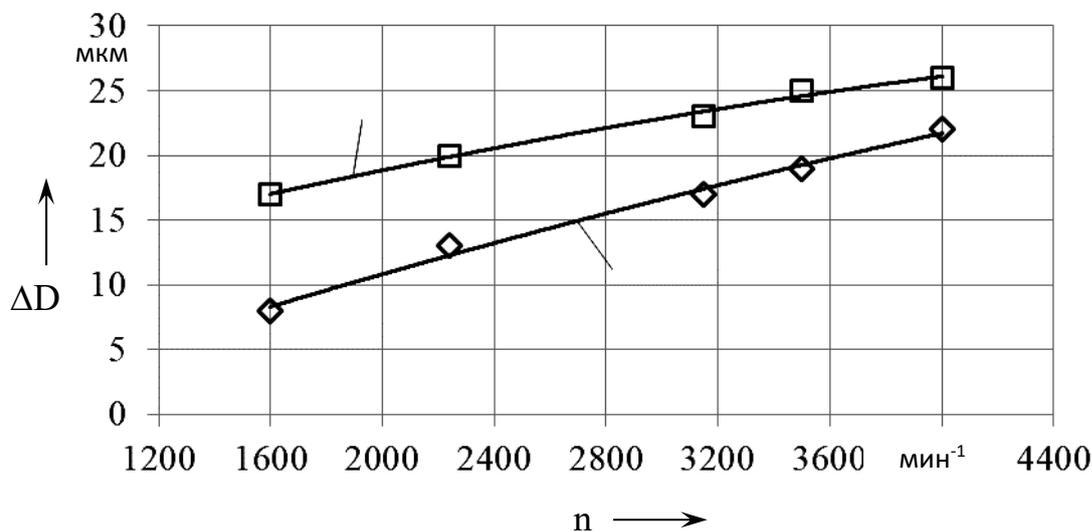


Рис. 1. Изменение диаметрального размера внутренней поверхности втулок от частоты вращения инструмента при СМДН: $Ra_{\text{неч}} = 3,2...3,0$ мкм; $d = 12$ мм; $S = 40$ мм/мин; 1 — сталь 45 (190...200 НВ); 2 — сталь 45 (30...35 HRC)

Анализ результатов исследований показал, что диапазон изменения диаметрального размера внутренней поверхности втулок составляет: для стали 45 (190...200 НВ) — 17...26 мкм, для стали 45 (30...35 HRC) — 8...22 мкм.

Исследование точности диаметрального размера внутренней поверхности нежестких ферромагнитных колец

Для выявления технологических возможностей метода СМДН были проведены статистические исследования точности получения диаметрального размера внутренней поверхности нежестких ферромагнитных колец (далее — колец) после их растачивания и последующего упрочнения совмещенной обработкой.

Обрабатывали партию колец в количестве 100 шт., размеры колец ($D \times d \times h$) — 125 × 110 × 20 мм, мате-

риал колец — сталь 45 (190...200 НВ).

Отверстия колец перед совмещенной упрочняющей обработкой растачивали в размер $\varnothing 110$ мм на станке модели 16К20Ф3 на режимах, указанных выше. Шероховатость внутренней поверхности колец после растачивания $Ra = 3,0...3,2$ мкм.

Диаметральный размер заготовок после растачивания и последующей обработки СМДН измеряли прибором для контроля внутреннего диаметра колец подшипников УД-2В-2М, оснащенный головкой измерительной пружинной (микрокатором) 2ИГПВГ ГОСТ 28798–90 с диапазоном измерений ± 60 мкм. Цена деления измерительной головки — 0,002 мкм.

С помощью положений математической статистики были построены эмпирические кривые распределения диаметрального размера отверстия колец после соответствующей обработки и определены их статистические характе-

ристики: среднее арифметическое значение диаметального размера \bar{X} , среднее квадратическое отклонение диаметального размера S . В соответствии с

этим строили эмпирические кривые распределения диаметального размера отверстия колец после их обработки точением и СМДН (рис. 2).

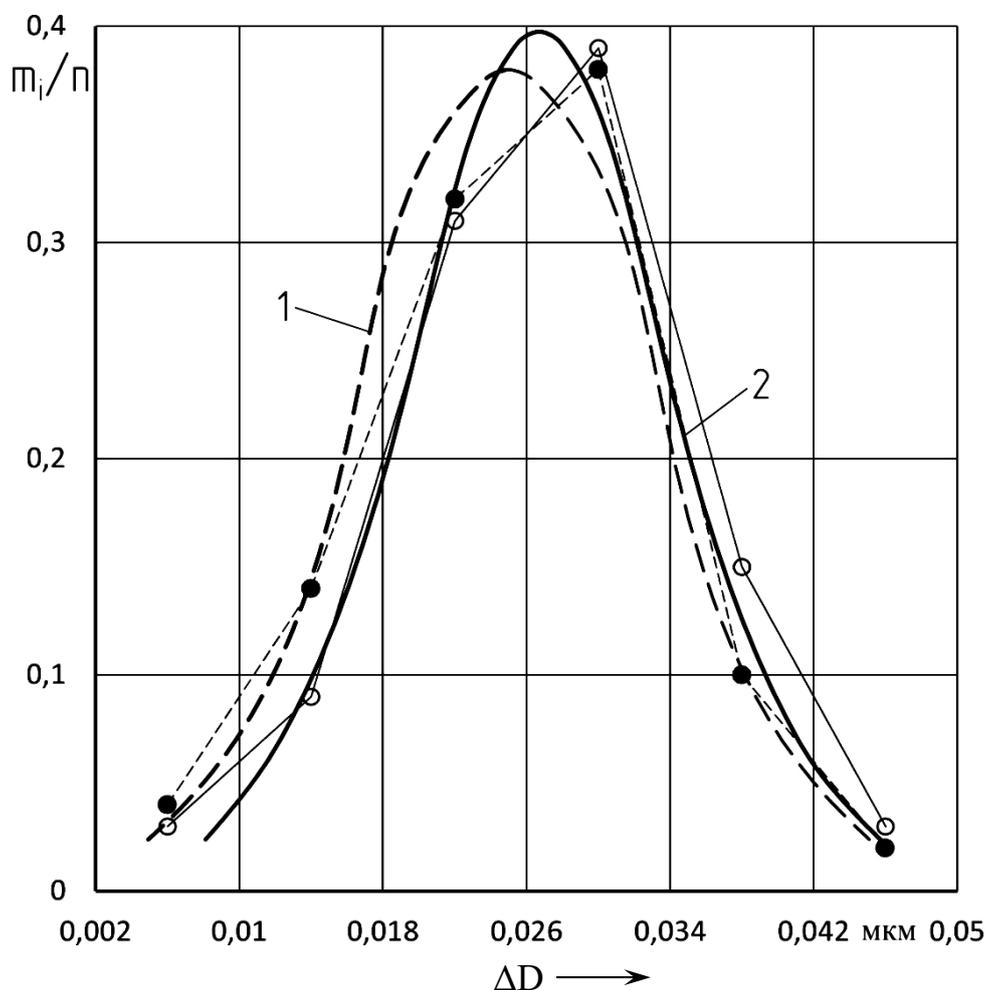


Рис. 2. Исследование точности диаметального размера отверстия обработанных колец: 1 – после растачивания; 2 – после СМДН

Для определения близости распределения диаметального размера отверстий партии расточенных колец к теоретическому закону нормального распределения были использованы критерии согласия λ (критерий А. Н. Колмогорова) и χ^2 (критерий Пирсона). Критерии согласия λ и χ^2 определяли расчетным путем по известным методикам [10–13]. Согласно расчетам, критерии согласия имели следующие значения: $\lambda = 0,306$; $\chi^2 = 1,818$.

Статистические характеристики распределения диаметального размера отверстия партии колец после растачивания составили $\bar{X}_1 = 0,025$ мм; $S_1 = 0,0084$ мм.

Сравнение фактического поля рассеивания диаметального размера отверстия колец ($6\sigma = 0,050$ мкм) с полями допусков, в которое оно укладывается, показало, что растачивание обеспечивает 8-й квалитет точности получения диаметального размера (в соответствии

с ГОСТ 25346–82).

Затем внутреннюю поверхность отверстия партии расточенных колец упрочняли СМДН на следующих режимах: $V = 1209$ м/мин ($n = 3500$ мин⁻¹); $S = 20$ мм/мин; индукция вращающегося магнитного поля, действующего на упрочняемую поверхность колец, – $0,130...0,135$ Тл; количество рабочих ходов инструмента – один; смазочно-охлаждающая жидкость – масло индустриальное 45.

Основные параметры применяемого для СМДН комбинированного инструмента представлены выше.

Шероховатость поверхности колец после упрочнения СМДН составила по параметру Ra $0,42...0,40$ мкм.

Для определения близости эмпирического закона распределения диаметрального размера отверстий партии колец, упрочненных СМДН, к теоретическому закону нормального распределения также использовали критерии согласия λ и χ^2 . Расчетные критерии согласия для колец, упрочненных СМДН, составили $\lambda = 0,309$; $\chi^2 = 1,825$.

Статистические характеристики распределения диаметрального размера отверстия колец после упрочнения СМДН $\bar{X}_2 = 0,028$ мм; $S_2 = 0,0079$ мм.

Поле рассеивания диаметрального размера внутренней поверхности колец после СМДН ($6\sigma = 0,047$ мм) несколько меньше, чем после обработки растачиванием, но также соответствовало 8-му качеству точности (в соответствии с ГОСТ 25346–82).

Таким образом, результаты статистических исследований позволили установить, что метод СМДН не изменяет исходную точность диаметрального размера отверстия нежестких стальных колец, полученную после растачивания. Это подтверждает гипотезу о том, что при СМДН деформирующие шары комбинированного инструмента взаимодействуют с упрочняемой поверхностью заготовки по «упругой» схеме.

Исследование точности формы поперечного сечения тонкостенных ферромагнитных цилиндров

Характеристика обрабатываемых тонкостенных ферромагнитных цилиндров (далее – цилиндров): материал – сталь 45 (190...200 НВ); размеры ($D \times d \times h$) – $114 \times 110 \times 80$ мм.

Погрешность геометрической формы поперечного сечения обрабатываемых цилиндров определяли как разность между максимальным и минимальным значениями диаметральных размеров обработанного отверстия. Измерение отклонения диаметра отверстия цилиндров осуществляли с помощью прибора УД-2В-М, описанного ранее.

Исследовали точность формы поперечного сечения трех партий цилиндров (по 100 штук в каждой), внутреннюю поверхность которых обрабатывали по сравниваемым технологиям.

Первая партия. Внутреннюю поверхность цилиндров растачивали в размер $\varnothing 110H8^{+0,054}$ мм на станке с ЧПУ 16К20Ф3. Режимы растачивания: $V = 108$ м/мин; $S = 0,15$ мм/об; $t = 0,25$ мм; охлаждение – эмульсия. Материал режущей части – Т15К6; шероховатость обработанной поверхности $Ra = 3,0...3,2$ мкм.

Вторая партия. Внутреннюю поверхность цилиндров первоначально растачивали в размер $\varnothing 110H8^{+0,054}$ мм на режимах, указанных выше, с обеспечением шероховатости по параметру $Ra = 3,0...3,2$ мкм. Затем внутреннюю поверхность цилиндров упрочняли СМДН.

Третья партия. После растачивания в размер $\varnothing 110H8^{+0,054}$ мм (с достижением шероховатости поверхности по параметру $Ra = 3,2...3,0$ мкм) внутреннюю поверхность цилиндров упрочняли алмазным выглаживанием на вертикально-фрезерном станке ВФ-130 с использованием специального инструмента.

Режимы алмазного выглаживания: $P = 10$ Н; $S = 80$ мм/мин; $V = 60$ м/мин; радиус алмазного выглаживателя –

2,5 мм; количество алмазных выглаживателей – 2 шт.; схема установки алмазных выглаживателей к обрабатываемой поверхности – «упругая»; охлаждение – масло индустриальное 20.

При этом базирование и закрепление цилиндров при обработке поверхности отверстия СМДН и алмазным выглаживанием осуществляли в специальном технологическом приспособлении, обеспечивающем приложение силы закрепления в их торец.

С помощью положений математической статистики были построены эмпирические кривые распределения отклонений от круглости поперечного сечения обработанных цилиндров по сравниваемым технологиям и определены их статистические характеристики: среднее арифметическое значение \bar{R} ; среднее квадратическое отклонение σ .

В соответствии с этим строили эмпирические кривые распределения погрешности формы поперечного сечения цилиндров для каждой из обрабатываемых партий (рис. 3).

Для определения близости эмпирического закона распределения погрешности формы обработанных цилиндров (отклонения от круглости в поперечном сечении) к теоретическому закону эксцентриситета (Релея) также были использованы критерии согласия λ (критерий А. Н. Колмогорова) и χ^2 (критерий Пирсона) [12].

Статистические характеристики распределения погрешности формы поперечного сечения цилиндров, обработанных по сравниваемым технологиям, составили:

– после растачивания отверстия $\bar{R}_1 = 0,0096$ мм, $S_1 = 0,0072$ мм;

– после растачивания отверстия и последующего упрочнения поверхности СМДН $\bar{R}_2 = 0,0092$ мм, $S_2 = 0,0063$ мм;

– после растачивания отверстия и последующего упрочнения поверхности алмазным выглаживанием $\bar{R}_3 = 0,0104$ мм, $S_3 = 0,0086$ мм.

Сравнение фактических полей расцеивания погрешности формы (отклонения от круглости) поперечного сечения обработанных по сравниваемым технологиям цилиндров ($\Delta R = 3,44\delta$) с полями допусков, в которые они укладываются, показали, что методы обработки обеспечивают следующие качества точности (в соответствии с ГОСТ 24643–81):

– растачивание: $\Delta\bar{R}_1 = 0,025$ мм – 8 квалитет ($\delta = 0,025$ мм);

– растачивание и СМДН: $\Delta\bar{R}_2 = 0,022$ мм – 8 квалитет ($\delta = 0,025$ мкм);

– растачивание и алмазное выглаживание: $\Delta\bar{R}_3 = 0,030$ мм – 9 квалитет ($\delta = 0,040$ мм).

Анализ результатов экспериментальных статистических исследований позволяет сделать следующий вывод: СМДН внутренней поверхности тонкостенных цилиндров (по отношению к растачиванию) обеспечивает повышение точности формы их поперечного сечения на 10 %...12 %, а по отношению к упрочнению алмазным выглаживанием – на 25 %...27 %.

В соответствии с полученными результатами экспериментальных исследований СМДН рекомендуется применять для отделочно-упрочняющей обработки внутренней поверхности тонкостенных (нежестких) тел вращения из ферромагнитных материалов взамен операции алмазного выглаживания с целью повышения точности формы их поперечного сечения.

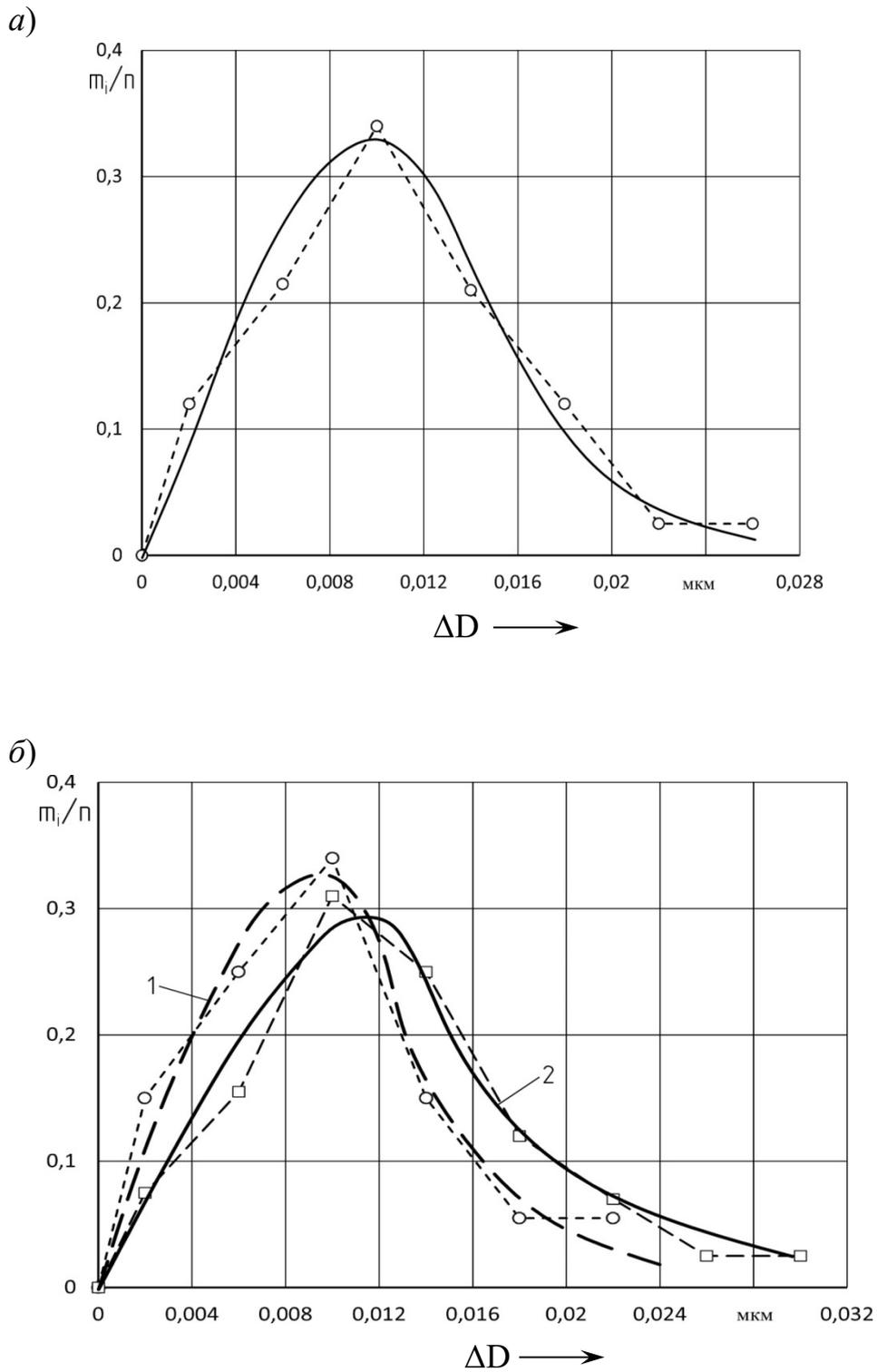


Рис. 3. Исследование точности формы поперечного сечения обработанных цилиндров: а – после растачивания; б – после СМДН и алмазного выглаживания; 1 – упрочнение СМДН; 2 – упрочнение алмазным выглаживанием

**Разработка метода СМДН,
обеспечивающего повышение
точности диаметрального размера
внутренней поверхности
ферромагнитных тел вращения**

Согласно разработанному методу, заготовки распределяют по группам в порядке возрастания их размеров, а затем каждую группу заготовок обрабатывают СМДН на рациональных режимах, обеспечивая тем самым требуемую величину (степень) деформации исходных микронеровностей их поверхностей, вызывающую соответствующее изменение диаметрального размера. *Первую группу* заготовок, имеющих наибольшие диаметральные размеры внутренней поверхности, обрабатывают с частотой вращения инструмента, обеспечивающей заданную чертежом шероховатость поверхности (как правило, с наиболее низкой частотой вращения комбинированного инструмента). *Вторую группу* заготовок, имеющих промежуточные значения диаметральных размеров внутренней поверхности, обрабатывают СМДН с наибольшей допустимой частотой вращения комбинированного инструмента. *Третью группу* заготовок, имеющих наименьшие диаметральные размеры внутренней поверхности, обрабатывают СМДН с наибольшей допустимой частотой вращения комбинированного инструмента, причем осуществляют два и более рабочих ходов комбинированного инструмента.

В случае, если исходная шероховатость внутренней поверхности заготовок, полученная на предыдущих операциях технологического процесса, соответствует требованиям чертежа, то первую группу заготовок, имеющих наибольшие диаметральные размеры внутренней поверхности, как правило, СМДН не обрабатывают.

Применение разработанного метода повышения точности диаметрального размера поверхности отверстия ферромагнитных нежестких тел вращения

предполагает предварительное получение экспериментальной зависимости шероховатости поверхности от частоты вращения комбинированного инструмента при обработке заготовок СМДН (с учетом твердости материала заготовок и исходной шероховатости поверхности), а также зависимости изменения шероховатости поверхности заготовок при упрочнении СМДН от числа рабочих ходов комбинированного инструмента (рис. 4).

При этом при деформации исходных микронеровностей поверхности заготовок СМДН изменение диаметрального размера определяется выражением

$$\begin{aligned} \Delta D_i &= 2(R_{Z_{исх}} - R_{Z_i}) = 2 \cdot 5 (R_{a_{исх}} - R_{a_i}) = \\ &= 10(R_{a_{исх}} - R_{a_i}), \end{aligned} \quad (1)$$

где ΔD_i – изменение диаметрального размера отверстия заготовок при упрочнении СМДН; $R_{Z_{исх}}$ и $R_{a_{исх}}$ – исходная шероховатость поверхности заготовок по параметрам R_z и R_a соответственно; R_{Z_i} и R_{a_i} – требуемая шероховатость поверхности заготовок, заданная чертежом, по параметрам R_z и R_a соответственно.

Предположим, что при частоте вращения комбинированного инструмента n_1 обеспечивается заданная чертежом шероховатость поверхности заготовки R_{a1} (см. рис. 4). Тогда изменение диаметрального размера отверстия заготовок

$$\Delta D_1 = 10(R_{a_{исх}} - R_{a1}).$$

Как видно из рис. 4 (зависимость 2), минимальная шероховатость поверхности заготовки (при максимальной деформации исходных микронеровностей), которая обеспечивается при СМДН за несколько рабочих ходов комбинированного инструмента, равна R_{a2} (достигается при частоте вращения инструмента n_5).

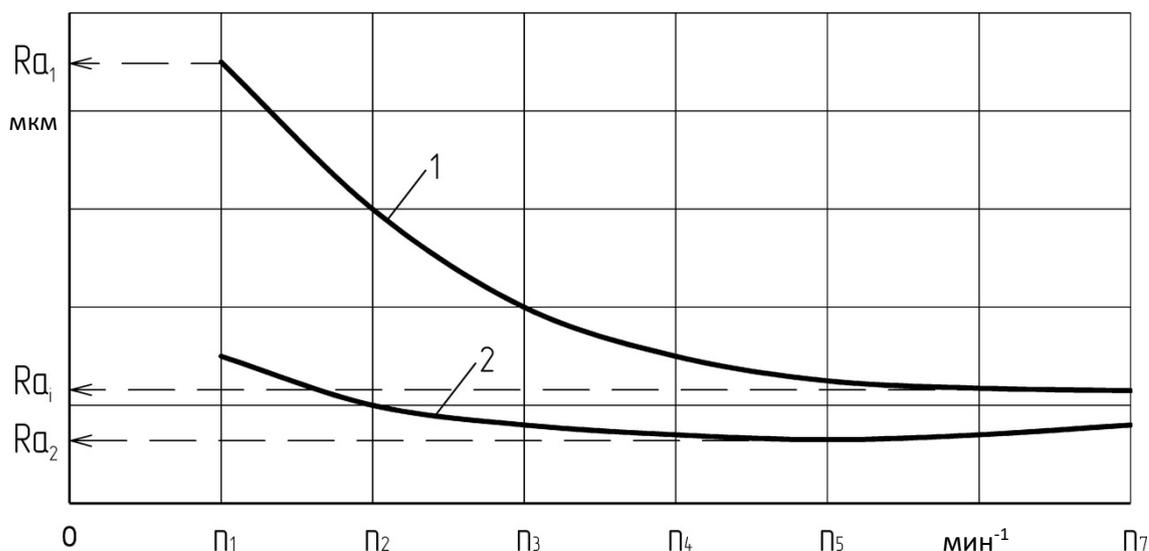


Рис. 4. Экспериментальные зависимости изменения шероховатости поверхности отверстия заготовок при обработке СМДН от частоты вращения инструмента (при исходной шероховатости поверхности заготовок $Ra_{исх}$): 1 – упрочнение СМДН за один рабочий ход комбинированного инструмента; 2 – упрочнение СМДН за несколько рабочих ходов комбинированного инструмента

Тогда находим соответствующее этой шероховатости поверхности изменение диаметрального размера заготовок:

$$\Delta D_2 = 10(Ra_{исх} - Ra_2).$$

Причем $\Delta D_2 > \Delta D_1$, т. к. из рис. 4 следует, что $Ra_1 > Ra_2$.

Пусть распределение диаметрального размера отверстия заготовок после растачивания и последующего СМДН подчиняется закону нормального распределения и имеет вид, изображенный на рис. 5, где ω_1 – поле рассеивания диаметрального размера отверстия заготовок после растачивания (исходная точность); ω_2 – поле рассеивания диаметрального размера отверстия заготовок по разработанному методу СМДН.

В соответствии с рис. 5 поле рассеивания диаметрального размера отверстия заготовок после растачивания и последующей обработки СМДН

$$\omega_2 = \omega_1 \Delta D_2 + \Delta D_1. \quad (2)$$

После подстановки значений ΔD_1 и ΔD_2 выражение (2) принимает вид:

$$\omega_2 = \omega_1 + 10(Ra_2 - Ra_1). \quad (3)$$

В выражении (3) второе слагаемое меньше нуля, т. к. $Ra_2 < Ra_1$. Следовательно, $\omega_2 < \omega_1$. Таким образом, разработанный метод СМДН обеспечивает уменьшение поля рассеивания диаметрального размера обрабатываемых заготовок.

Разработанный метод СМДН (в зависимости от исходной шероховатости поверхности, твердости материала заготовок и величины допуска на размер) позволяет уменьшить поле рассеивания диаметрального размера отверстия обрабатываемых заготовок на 15 % ... 20 %.

Эффективность разработанного метода СМДН повышается с уменьшением поля допуска на диаметральный размер отверстия заготовок.

Разработанный метод СМДН наиболее целесообразно использовать в технологиях высокоточной обработки дета-

лей, требующих изменения диаметрального размера в микронном диапазоне.

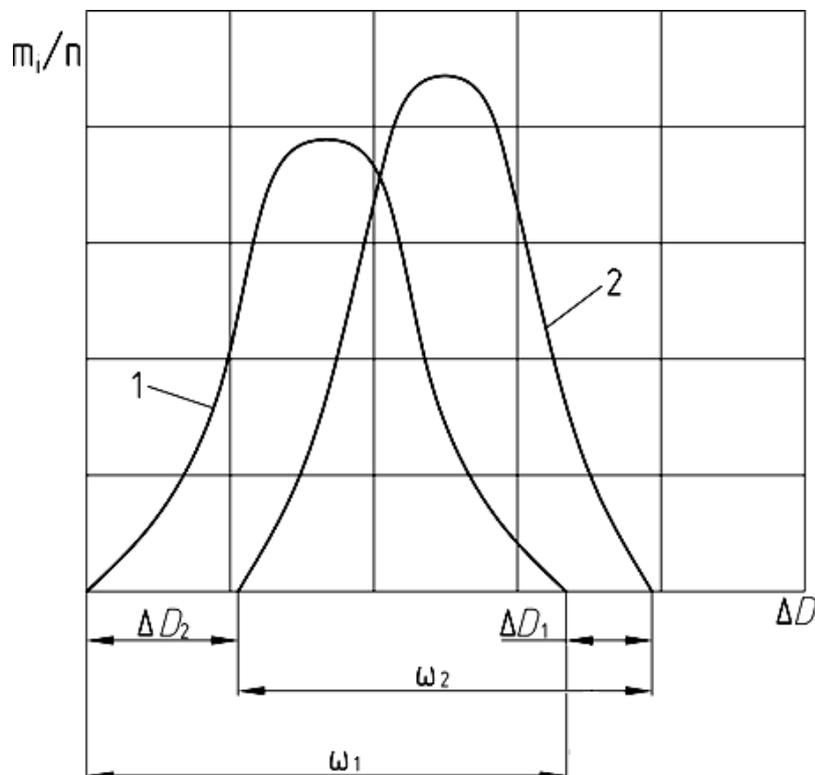


Рис. 5. Распределение диаметрального размера отверстия заготовок по сравниваемым технологиям: 1 – после растачивания отверстия; 2 – после растачивания и последующей обработки разработанным методом СМДН

Заключение

В ходе исследований установлено, что метод СМДН (в зависимости от частоты вращения инструмента) изменяет диаметральный размер внутренней поверхности в следующих диапазонах: 17...26 мкм для втулок из стали 45 (190...200 НВ) и 8...22 мкм для втулок из стали 45 (30...35 HRC).

Установлено, что метод СМДН не изменяет исходный квалитет точности диаметрального размера отверстия обрабатываемой партии стальных нежестких колец, полученный после растачивания.

Выявлено, что метод СМДН внутренней поверхности тонкостен-

ных стальных цилиндров по отношению к растачиванию обеспечивает повышение точности формы их поперечного сечения на 10 %...12 %, а по отношению к упрочнению алмазным выглаживанием – на 25 %...27 %.

Разработан метод отделочно-упрочняющей обработки, при котором заготовки обрабатываемой партии разбивают на группы, а детали каждой группы обрабатывают СМДН на режимах, вызывающих требуемую степень деформации исходных микронеровностей. Метод позволяет уменьшить поле рассеивания диаметрального размера отверстия обрабатываемых нежестких ферромагнитных заготовок на 15 %...20 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ящерицын, П. И.** Упрочняющая обработка нежестких деталей в машиностроении / П. И. Ящерицын, А. П. Минаков. – Минск: Наука и техника, 1986. – 215 с.
2. **Смелянский, В. М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – Москва: Машиностроение, 2002. – 300 с.
3. Научно-технические технологии в машиностроении / Под ред. А. Г. Сулова. – Москва: Машиностроение, 2012. – 528 с.
4. **Григорьев, С. Н.** Технологии нанообработки: учебное пособие / С. Н. Григорьев, А. А. Грибков, С. В. Алешин. – Старый Оскол : ТНТ, 2011. – 320 с.
5. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. RU 2068770 / А. М. Довгалева. – Опубл. 10.11.1996.
6. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. RU 2089373 / А. М. Довгалева. – Опубл. 10.09.1997.
7. **Довгалева, А. М.** Магнитно-динамическое и совмещенное накатывание поверхностей нежестких деталей / А. М. Довгалева. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 266 с.
8. **Довгалева, А. М.** Повышение эффективности упрочнения поверхностей ферромагнитных деталей совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / А. М. Довгалева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 18–35.
9. **Шелег, В. К.** Исследование триботехнических свойств поверхностей деталей, упрочненных совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / В. К. Шелег, А. М. Довгалева // Актуальные вопросы машиноведения. – 2018. – Т. 7. – С. 330–334.
10. **Кобзарь, А. Н.** Прикладная математическая статистика / А. Н. Кобзарь. – Москва: Физматлит, 2008. – 816 с.
11. **Горлач, Б. А.** Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие / Б. А. Горлач. – Санкт-Петербург: Лань, 2016. – 320 с.
12. **Солонин, Н. С.** Математическая статистика в технологии машиностроения / Н. С. Солонин. – Москва: Машиностроение, 1972. – 215 с.
13. **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 26 апреля 2021 года

Валерий Константинович Шелег, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН Беларуси, Белорусский национальный технический университет. E-mail: sheleh_v@tut.by.

Александр Михайлович Довгалева, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-29-345-40-56. E-mail: rct@bru.by.

Иван Анатольевич Тарадейко, ассистент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-33-659-38-68. E-mail: IvanTaradeiko@yandex.ru.

Valery Konstantinovich Sheleg, DSc (Engineering), Prof., corresponding member of NSA Republic of Belarus, Belarusian National Technical University. Phone: +375-29-698-92-64. E-mail: sheleh_v@tut.by.

Alexander Mikhailovich Dovgalev, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-29-345-40-56. E-mail: rct@bru.by.

Ivan Anatolievich Taradeiko, assistant lecturer, Belarusian-Russian University. Phone: +375-33-659-38-68. E-mail: IvanTaradeiko@yandex.ru.