



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 621.787.4  
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-101-110

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕВЕРСИВНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Нгуен Хыу Хай, Зайдес С.А.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**Аннотация.** **Актуальность работы.** Разработка новых способов упрочнения, к которым относится, в частности, реверсивное выглаживание, требует научно обоснованного определения режимов обработки, обеспечивающих получение определенных характеристик качества поверхностного слоя. Результаты экспериментальных исследований показали, что закономерность изменения показателей качества поверхностного слоя деталей машин в зависимости от технологических параметров и режимов реверсивного выглаживания обладает неоднозначным характером. В этой связи особый интерес представляет задача по определению рациональных режимов поверхностного пластического деформирования при реверсивном выглаживании. **Цель работы.** Определение рациональных режимов поверхностного пластического деформирования при реверсивном выглаживании, которые бы позволили получить режимы обработки, обеспечивающие получение минимально возможных значений микрогеометрических характеристик поверхности и максимально возможных значений механических свойств упрочненного слоя. **Используемые методы.** В работе использованы экспериментальные методы определения показателей качества упрочненного слоя цилиндрических деталей и множественный регрессионный анализ для обработки полученных результатов. **Новизна.** Для определения рациональных режимов обработки получены эмпирические зависимости отдельных показателей качества от технологических параметров процесса реверсивного выглаживания. Результаты множественного регрессионного анализа обработаны в компьютерной программе *Microsoft Visual Studio 2012*. **Результат.** Установлено, что рациональные режимы реверсивного выглаживания обеспечивают наименьшие микрогеометрические параметры поверхности, высокие механические свойства и большие сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое цилиндрических деталей машин. **Практическая значимость.** Для получения наименьших микрогеометрических показателей поверхности упрочненных деталей (шероховатость, волнистость и отклонение от круглости) установлены следующие режимы упрочнения:  $S_{пр} = 0,07-0,10$  мм/об;  $n_p = 60-100$  об/мин;  $t = 0,08-0,10$  мм;  $n_r = 115-120$  дв. ход/мин;  $\alpha_n = 90^\circ$  и  $\alpha_p = \pm 10 \pm 20^\circ$ . Для повышения сжимающих остаточных напряжений и механических свойств поверхностного слоя деталей рекомендуются следующие режимы упрочнения:  $S_{пр} = 0,07-0,10$  мм/об;  $n_p = 280-300$  об/мин;  $t = 0,28-0,30$  мм;  $n_r = 290-300$  дв. ход/мин;  $\alpha_n = 90^\circ$  и  $\alpha_p = \pm 55 \pm 60^\circ$ .

**Ключевые слова:** реверсивное выглаживание, микротвердость, шероховатость, сжимающие остаточные напряжения, рациональные режимы обработки

© Нгуен Хыу Хай, Зайдес С.А., 2024

### Для цитирования

Нгуен Хыу Хай, Зайдес С.А. Определение рациональных режимов реверсивного выглаживания цилиндрических деталей машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 101-110. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-101-110>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# DETERMINATION OF RATIONAL REVERSE BURNISHING MODES FOR CYLINDRICAL MACHINE PARTS

Nguyen Huu Hai, Zaides S.A.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract. Relevance.** The development of new methods of hardening, which include, in particular, reverse burnishing, requires a scientifically based determination of processing modes that ensure the achievement of certain quality characteristics of the surface layer. The experimental studies showed that the pattern of changes in the quality indicators of the surface layer of machine parts, depending on the technological parameters and reverse burnishing modes, was ambiguous. In this regard, the task of determining rational SPD modes during reverse burnishing is of particular interest. **Objectives.** Determination of rational SPD modes during reverse burnishing, which would contribute to obtaining processing modes that ensure obtaining the minimum possible values of the microgeometric characteristics of the surface and the maximum possible values of the mechanical properties of the hardened layer. **Methods Applied.** The study applied experimental methods for determining the quality indicators of the hardened layer of cylindrical parts and multiple regression analysis to process the results obtained. **Originality.** To determine rational processing modes, the authors determined empirical patterns of individual quality indicators and the technological parameters of the reverse burnishing process. The results of multiple regression analysis were processed in the computer program Microsoft Visual Studio 2012. **Result.** It has been established that rational reverse burnishing modes provide for the lowest microgeometric surface parameters, high mechanical properties and large compressive residual stresses in the surface layer of cylindrical machine parts. **Practical Relevance.** To obtain the lowest microgeometric parameters of the surface of hardened parts (roughness, waviness and out-of-roundness), the following hardening modes are established:  $S_{pr} = 0.07 \div 0.10$  mm/rev;  $n_p = 60 \div 100$  rpm;  $t = 0.08 \div 0.10$  mm;  $n_p = 115 \div 120$  stroke/min;  $\alpha_{нi} = 90^\circ$  and  $\alpha_p = \pm 10^\circ \div \pm 20^\circ$ . To increase compressive residual stresses and mechanical properties of the surface layer of parts, it is recommended to apply the following hardening modes:  $S_{pr} = 0.07 \div 0.10$  mm/rev;  $n_p = 280 \div 300$  rpm;  $t = 0.28 \div 0.30$  mm;  $n_p = 290 \div 300$  stroke/min;  $\alpha_{нi} = 90^\circ$  and  $\alpha_p = \pm 55^\circ \div \pm 60^\circ$ .

**Keywords:** reverse burnishing, microhardness, roughness, compressive residual stresses, rational processing modes

## For citation

Nguyen Huu Hai, Zaides S.A. Determination of Rational Reverse Burnishing Modes for Cylindrical Machine Parts. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 101-110. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-101-110>

## Введение

Надежность работы изделий машиностроения во многом зависит от качества изготовления отдельных деталей и элементов конструкций. При этом под качеством деталей понимают не только соответствие размеров и точности формы указанным на чертежах, но и состояние поверхностного слоя [1-3]. Обычно на чертежах чаще всего указывают параметры шероховатости поверхности и реже – характеристики твердости. Поверхностный слой деталей машин существенно отличается от основной массы металла не только физико-механическими характеристиками, микроструктурой, но и активностью атомов металла, которые взаимодействует с внешней средой [4-6].

Поверхностный слой в отличие от основной массы изделия в первую очередь испытывает внешнее воздействие – силовое, температурное, агрессивное и др. [6]. Именно поверхностные слои подвергаются коррозии, износу, повреждениям, в этих слоях в первую очередь формируются очаги напряженности, локализуются микродефекты, которые преобразуются в начальные микротрещины [7, 8].

В этой связи и особенно для ответственных деталей и деталей, работающих в сложных условиях экс-

плуатации, ведутся постоянные работы по защите поверхностного слоя от внешнего воздействия. К защитным технологиям можно отнести покраску, полимерные покрытия, металлизацию, термическую и химико-термическую обработку и ряд других [9, 10]. Однако многие известные технологии требуют существенных материальных затрат, дорогое технологическое оборудование, дополнительные производственные помещения. К менее затратным технологическим процессам относятся отделочно-упрочняющие технологии на основе поверхностного пластического деформирования [11-14]. Такие технологии основаны на пластическом деформировании тонкого поверхностного слоя деталей машин. Деформирующая упрочняющая обработка позволяет не только сгладить микронеровности поверхности и упрочнить поверхностный слой, но и сформировать в нем сжимающие остаточные напряжения и изменить зеренную структуру материала [15, 16].

В настоящее время известно достаточно большое количество способов поверхностного пластического деформирования (ППД) с использованием разнообразных по конструкции рабочих инструментов [17, 18]. Однако многие из них основаны на достаточно простой кинематике процесса – вращение заготовки и

осевое перемещение деформирующего инструмента. Такая кинематика обеспечивает достаточно эффективное сглаживание микронеровностей, но степень упрочнения при этом не высокая.

При упрочнении ППД нежестких деталей типа валов и осей сложно получить высокую степень упрочнения при сохранении прямолинейности деталей. В этом случае требуется усилить напряженное состояние в очаге деформации без повышения радиального воздействия от рабочего инструмента.

Авторами статьи разработан новый способ ППД, основанный на реверсивном выглаживании поверхности тороидальным роликом [19]. Были выполнены численные расчеты на основе конечно-элементного моделирования и проведены экспериментальные исследования по определению влияния параметров и режимов деформирования на напряженное состояние и качество поверхностного слоя деталей машин [20, 21].

Исследования показали, что параметры реверсивного выглаживания неоднозначно влияют на качество поверхности. Такие результаты будут полезны, если необходимо получить только один из параметров качества, например шероховатость или твердость. А если необходимо получить при упрочнении поверхностный слой с максимально возможной твердостью и при этом с минимальной шероховатостью поверхности, то вопрос остается открытым.

Поэтому целью данной работы является определение рациональных режимов ППД при реверсивном выглаживании, обеспечивающих получение минимально возможных значений микрогеометрических

характеристик поверхности и максимально возможных значений механических свойств упрочненного слоя.

### Материалы и методы исследования

**Определение рациональных режимов процесса реверсивного выглаживания.** Технология реверсивного выглаживания представляет собой сложный многофакторный процесс со следующими технологическими параметрами упрочнения: продольная подача  $S_{пр}$ , частота вращения заготовки  $n_3$ , радиальный натяг  $t$ , реверсивная частота вращения рабочего инструмента  $n_p$ , начальный угол установки рабочего инструмента  $\alpha_n$  и амплитуда угла реверсивного вращения рабочего инструмента  $\alpha_p$ . Эти параметры оказывают неоднозначное влияние на характеристики качества деталей машин. Например, экспериментальные результаты в работах [21, 22] показывают, что уменьшение продольной подачи РИ, частоты вращения заготовки, величины радиального натяга и реверсивной частоты вращения РИ приводит к уменьшению шероховатости поверхности и отклонению от круглости упрочненных деталей, но в этом случае снижаются микротвердость и величина сжимающих остаточных напряжений поверхностного слоя.

Зависимость качества упрочненных деталей от основных технологических параметров реверсивного выглаживания представлена в работах [21-24], часть которых приведена на рис. 1 и 2. Изменение параметров шероховатости упрочненных деталей машин в зависимости от технологических параметров реверсивного выглаживания показано на рис. 1.

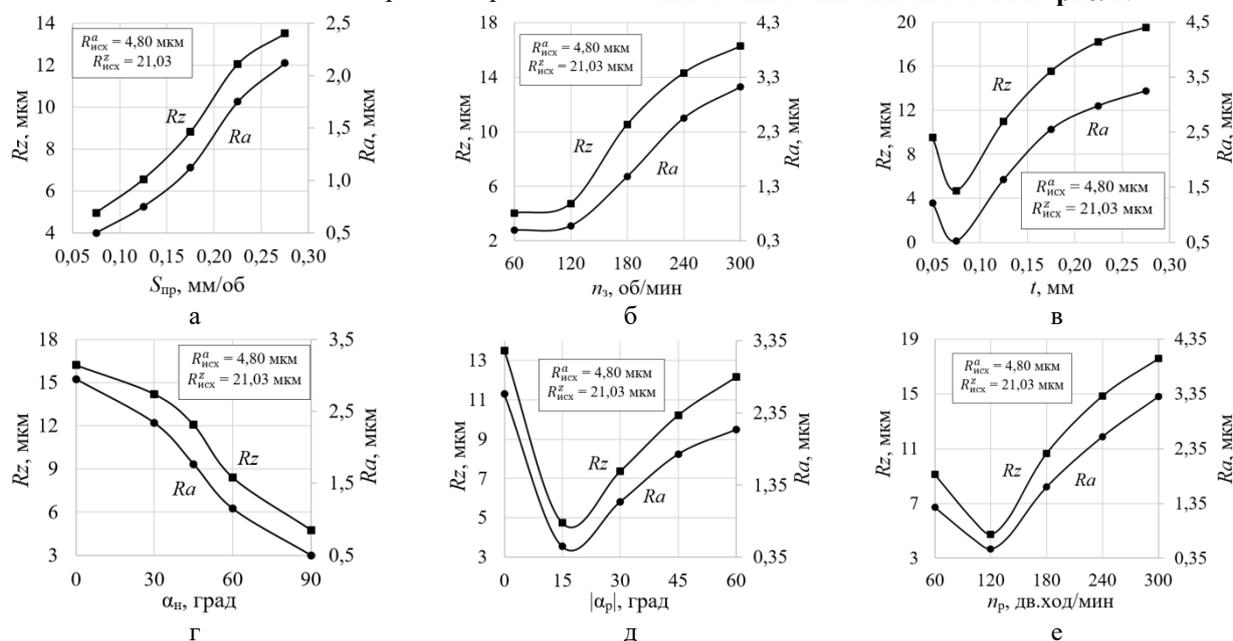


Рис. 1. Изменение параметров шероховатости  $Ra$ ,  $Rz$  от параметров технологического процесса: а – продольная подача  $S_{пр}$ ; б – частота вращения заготовки  $n_3$ ; в – радиальный натяг  $t$ ; г – начальный угол установки рабочего инструмента  $\alpha_n$ ; д – амплитуда угла реверса рабочего инструмента  $\alpha_p$ ; е – частота реверса рабочего инструмента  $n_p$

Fig. 1. Change in roughness parameters ( $Ra$ ,  $Rz$ ) depending on process parameters: а is longitudinal feed ( $S_{пр}$ ); б is workpiece rotation speed ( $n_3$ ); в is radial interference ( $t$ ); г is initial angle of installation of the working tool ( $\alpha_n$ ); д is amplitude of the angle of the working tool reverse ( $\alpha_p$ ); е is working tool reverse frequency ( $n_p$ )

Следует пояснить, что для реализации реверсивного выглаживания не требуется дополнительной обработки, как, например, при алмазном выглаживании. Обычное полуступенчатое точение перед реверсивным выглаживанием позволяет получить поверхность, которая по величине шероховатости соответствует чистовому шлифованию.

Изменение микротвердости поверхностного слоя упрочненных деталей машин в зависимости от технологических параметров реверсивного выглаживания показано на **рис. 2**.

Таким образом, в связи с вышеизложенным именно определение рациональных режимов процесса реверсивного выглаживания, обеспечивающих получение наилучших значений показателей качества деталей машин, представляет значительный практический интерес.

Для решения задачи по получению наилучших значений характеристик качества поверхностного слоя упрочненных деталей реверсивным выглаживанием использована компьютерная программа *Microsoft Visual Studio 2012*, в которой были приняты следующие входные параметры технологического процесса:

$S_{пр} = 0,07-0,28$  мм/об;  $n_3 = 60-300$  об/мин;  $t = 0,07-0,28$  мм;  $\alpha_n = 0-90^\circ$ ;  $\alpha_p = 0-15^\circ$  и  $n_p = 60-300$  дв. ход/мин.

Исходными данными для проведения расчетов в компьютерной программе являются однофакторные уравнения (1)-(6), полученные по результатам экспериментальных исследований. Каждое из систем уравнений (1)-(6) имеет 6 параметров обработки ( $S_{пр}, n_3, t, n_p, \alpha_n, \alpha_p$ ). Эти 6 параметров образуют 15 независимых пар, таких как ( $S_{пр}, n_3$ ), ( $n_3, t$ ), ( $t, n_p$ ), ... . Для каждой пары параметров после обработки в компьютерной программе *Microsoft Visual Studio 2012* получен соответствующий график в трехкоординатной системе (**рис. 3 и 4**). Остальные пары параметров обрабатываются аналогично (в данной статье представлены только результаты обработки 6-ти пар параметров). Затем выполнен анализ каждого полученного графика, чтобы найти значения пары параметров, при которых достигаются наилучшие значения характеристик качества поверхностного слоя упрочненных деталей. После этого выбран интервал режимов обработки, при которых получаются наилучшие значения показателя качества поверхности.

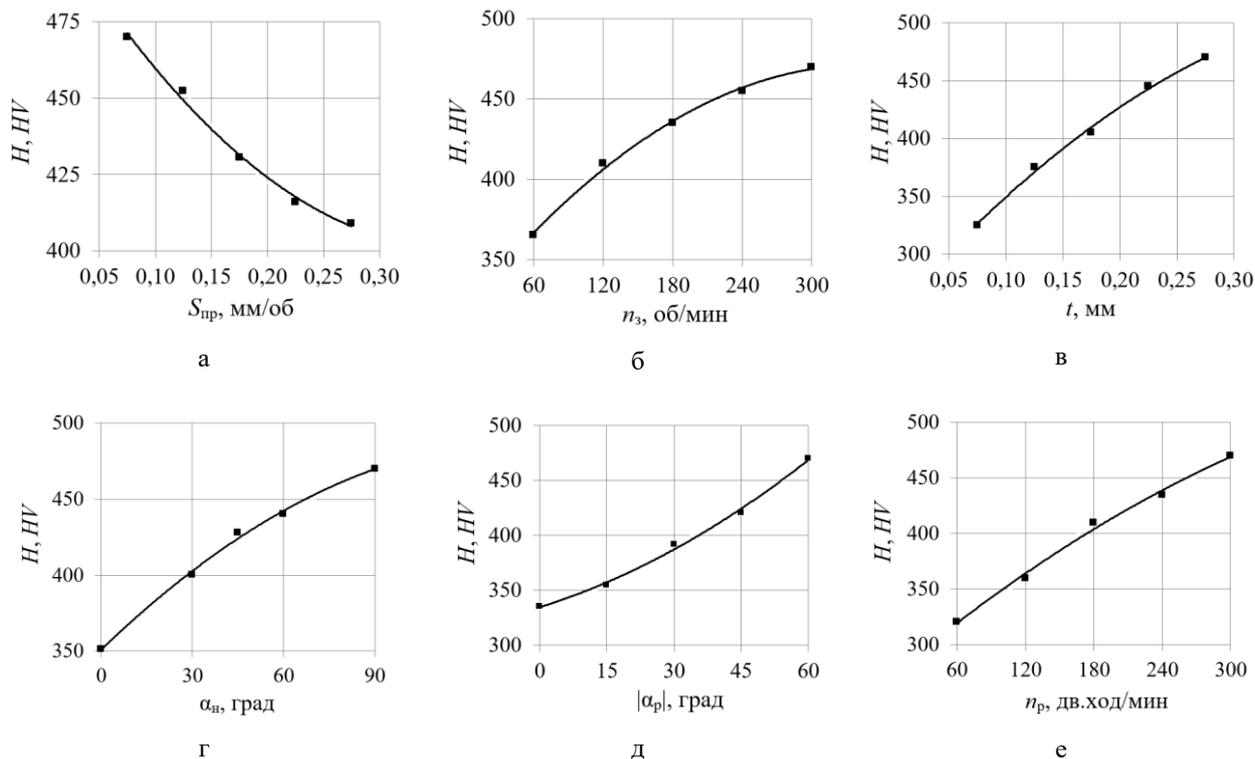


Рис. 2. Изменение микротвердости  $H$  от параметров технологического процесса: а – продольная подача  $S_{пр}$ ; б – частота вращения заготовки  $n_3$ ; в – радиальный натяг  $t$ ; г – начальный угол установки рабочего инструмента  $\alpha_n$ ; д – амплитуда угла реверса рабочего инструмента  $\alpha_p$ ; е – частота реверса рабочего инструмента  $n_p$

Fig. 2. Change in microhardness ( $H$ ) depending on process parameters: а is longitudinal feed ( $S_{пр}$ ); б is workpiece rotation speed ( $n_3$ ); в is radial interference ( $t$ ); г is initial angle of installation of the working tool ( $\alpha_n$ ); д is amplitude of the angle of the working tool reverse ( $\alpha_p$ ); е is working tool reverse frequency ( $n_p$ )

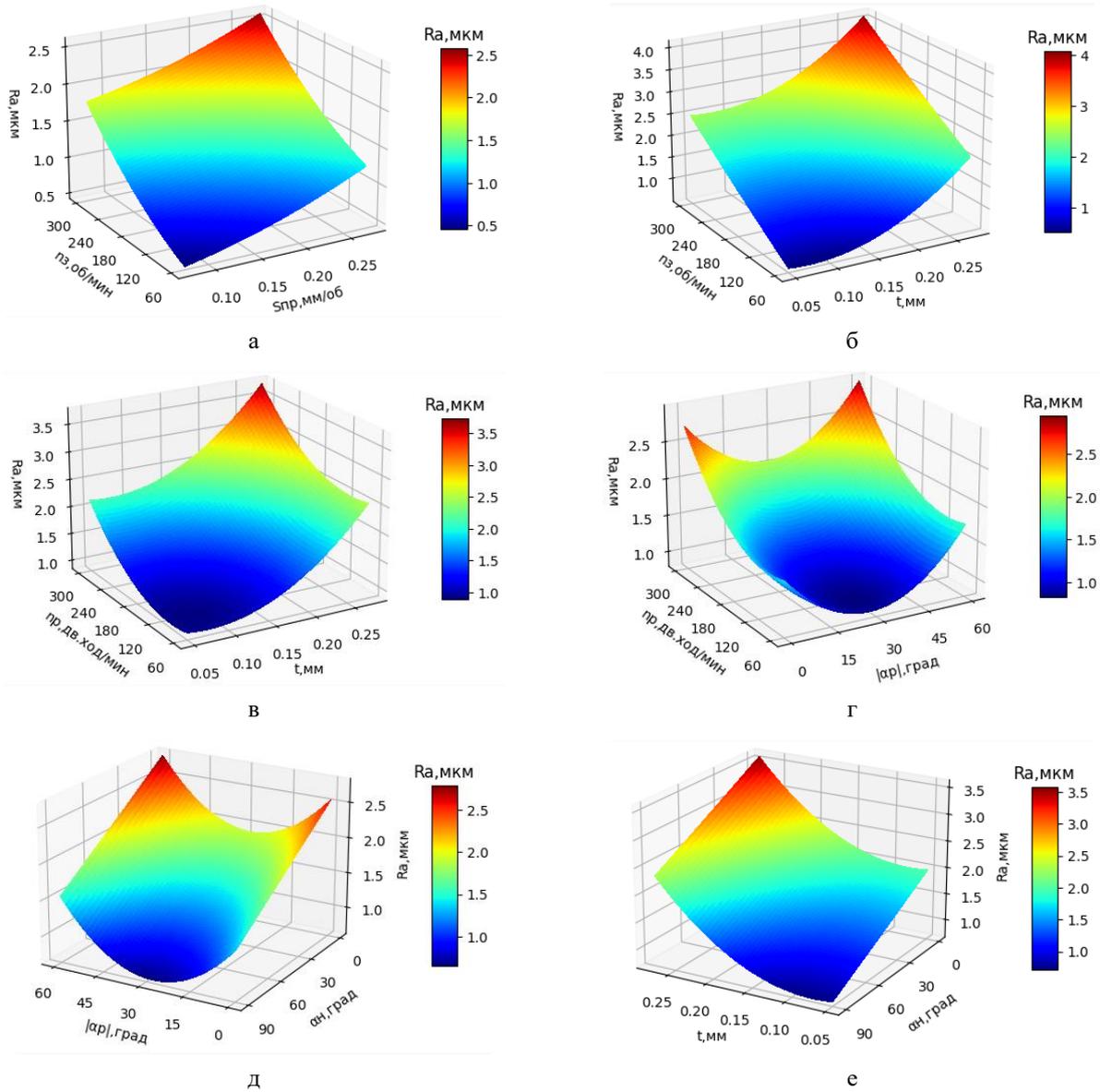


Рис. 3. Зависимость шероховатости  $Ra$  от двухфакторных комбинаций параметров реверсивного выглаживания: а –  $(n_3, S_{пр})$ ; б –  $(n_3, t)$ ; в –  $(n_p, t)$ ; г –  $(n_p, \alpha_p)$ ; д –  $(\alpha_p, \alpha_n)$ ; е –  $(t, \alpha_n)$

Fig. 3. Dependence between roughness ( $Ra$ ) and two-factor combinations of reverse burnishing parameters: а is  $(n_3, S_{пр})$ ; б is  $(n_3, t)$ ; в is  $(n_p, t)$ ; г is  $(n_p, \alpha_p)$ ; д is  $(\alpha_p, \alpha_n)$ ; е is  $(t, \alpha_n)$

Параметры шероховатости  $Ra$ :

$$Ra = \begin{cases} 16S_{пр}^2 + 2,36S_{пр} + 0,301 \\ (2E - 05)n_3^2 + 0,0038n_3 + 0,058 \\ -8,3462t^2 + 14,3t + 0,0717 \\ (6E - 05)n_p^2 - 0,0117n_p + 1,4429 \\ 0,0017\alpha_p^2 - 0,0943\alpha_p + 2,1018 \\ (5E - 06)\alpha_n^2 - 0,0281\alpha_n + 3,009 \end{cases} \quad (1)$$

Отклонение от круглости  $\Delta_{кр}$ :

$$\Delta_{кр} = \begin{cases} 37,43S_{пр}^2 + 15,16S_{пр} + 3,73 \\ (9E - 05)n_3^2 + 0,0125n_3 + 3,2480 \\ 522,94t^2 - 57,565t + 7,7735 \\ 0,0002n_p^2 - 0,045n_p + 8,1626 \\ 0,0091\alpha_p^2 - 0,5203\alpha_p + 13,551 \\ -0,0004\alpha_n^2 - 0,0432\alpha_n + 12,472 \end{cases} \quad (2)$$

Величина сжимающих остаточных напряжений  $\sigma^{ост}$ :

$$\sigma^{ост} = \begin{cases} 1303,3S_{np}^2 - 696,45S_{np} + 353,24 \\ -0,0006n_3^2 + 0,4024n_3 + 269,04 \\ -724,05t^2 + 439,9t + 279,86 \\ 0,0003n_p^2 + 0,0338n_p + 301,4 \\ 0,0295\alpha_p^2 + 0,172\alpha_p + 213,76 \\ -0,0066\alpha_H^2 + 1,6015\alpha_H + 217,38 \end{cases} \quad (3)$$

Высота волнистости  $W_z$ :

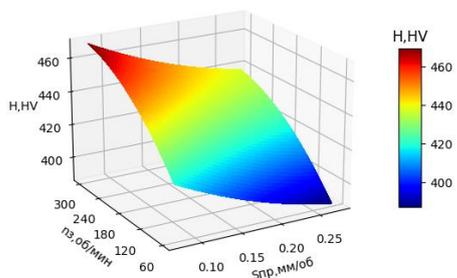
$$W_z = \begin{cases} 14S_{np}^2 + 31,24S_{np} + 2,87 \\ 0,0002n_3^2 - 0,0234n_3 + 5,8977 \\ 449,34t^2 - 60,54t + 8,33 \\ 0,0001n_p^2 - 0,0052n_p + 5,7421 \\ 0,0061\alpha_p^2 - 0,3315\alpha_p + 11,007 \\ 0,0002\alpha_H^2 - 0,1003\alpha_H + 12,5 \end{cases} \quad (5)$$

Микротвердость  $HV$ :

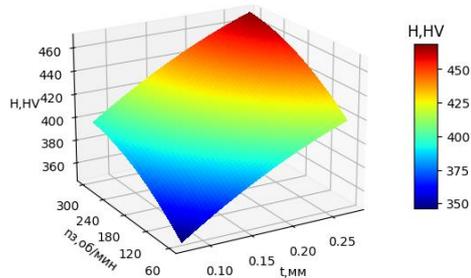
$$HV = \begin{cases} 820S_{np}^2 - 603,6S_{np} + 511,98 \\ -0,0013n_3^2 + 0,8893n_3 + 318 \\ -1168,6t^2 + 1128,4t + 248,32 \\ -0,0007n_p^2 + 0,866n_p + 269,32 \\ 0,016\alpha_p^2 + 1,2724\alpha_p + 334,78 \\ -0,0068\alpha_H^2 + 1,9278\alpha_H + 351,06 \end{cases} \quad (4)$$

Глубина наклепа  $h$ :

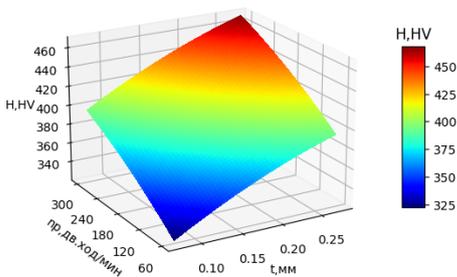
$$h = \begin{cases} 1,11S_{np}^2 - 0,83S_{np} + 0,96 \\ (-1E - 06)n_3^2 + 0,0009n_3 + 0,8058 \\ -3,71t^2 + 4,64t + 0,59 \\ (2E - 06)n_p^2 + 0,0027n_p + 0,61 \\ (-7E - 05)\alpha_p^2 + 0,004\alpha_p + 0,8241 \\ (2E - 06)\alpha_H^2 + 0,0008\alpha_H + 0,8163 \end{cases} \quad (6)$$



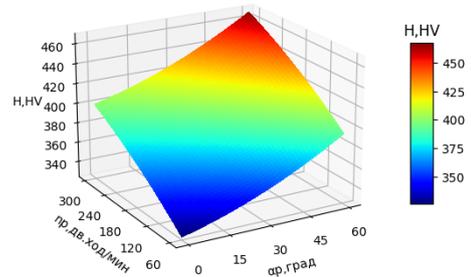
а



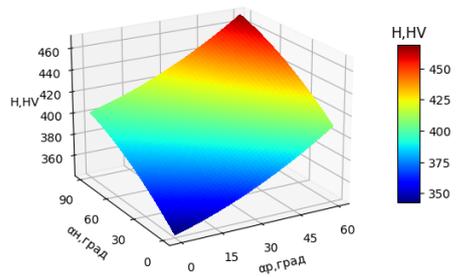
б



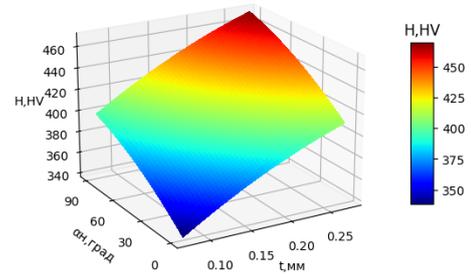
в



г



д



е

Рис. 4. Зависимость микротвердости  $H$  от двухфакторных комбинаций параметров реверсивного выглаживания: а –  $(n_3, S_{np})$ ; б –  $(n_3, t)$ ; в –  $(n_p, t)$ ; г –  $(n_p, \alpha_p)$ ; д –  $(\alpha_p, \alpha_H)$ ; е –  $(t, \alpha_H)$

Fig. 4. Dependence between microhardness ( $H$ ) and two-factor combinations of reverse burnishing parameters: а is  $(n_3, S_{np})$ ; б is  $(n_3, t)$ ; в is  $(n_p, t)$ ; г is  $(n_p, \alpha_p)$ ; д is  $(\alpha_p, \alpha_H)$ ; е is  $(t, \alpha_H)$

**Результаты и их обсуждение**

На **рис. 3** представлено несколько примеров статистической обработки по определению рациональных режимов упрочнения, обеспечивающих получение наименьших значений параметров шероховатости поверхности упрочненных деталей, а на **рис. 4** – наибольшей микротвердости поверхностного слоя упрочненных деталей.

На **рис. 3** темно-синим цветом обозначена область, соответствующая наименьшему значению параметра шероховатости поверхности упрочненных деталей. По **рис. 4** установлено, что наименьшая шероховатость (0,5-0,52 мкм) достигается при следующих рациональных значениях технологических параметров реверсивного выглаживания:  $S_{пр} = 0,07-0,10$  мм/об;  $n_3 = 60-100$  об/мин;  $t = 0,07-0,10$  мм;  $n_p = 115-125$  дв. ход/мин;  $\alpha_n = 90^\circ$  и  $\alpha_p = \pm 10-\pm 20^\circ$ .

На **рис. 4** темно-красный цвет представляет собой область, соответствующую наибольшему значению максимальной микротвердости поверхностного слоя. Рациональные режимы упрочнения, обеспечивающие максимальную микротвердость (465-470 HV), следующие:  $S_{пр} = 0,07-0,08$  мм/об;  $n_3 = 280-300$  об/мин;  $t = 0,25-0,28$  мм;  $n_p = 270-300$  дв. ход/мин;  $\alpha_n = 90^\circ$  и  $\alpha_p = \pm 55-\pm 60^\circ$ .

На основе результатов экспериментальных исследований и численных расчетов, необходимые режимы для параметров процесса реверсивного выглаживания приведены в **таблице**.

Таким образом, по результатам множественной регрессии определены рациональные режимы реверсивного выглаживания, обеспечивающие наилучшие значения показателей качества поверхности деталей. Для получения наименьших значений микрогеомет-

рических показателей поверхности упрочненных деталей (шероховатость, волнистость и отклонение от круглости) установлены следующие режимы упрочнения:  $S_{пр} = 0,07-0,10$  мм/об;  $n_p = 60-100$  об/мин;  $t = 0,08-0,10$  мм;  $n_p = 115-120$  дв. ход/мин;  $\alpha_n = 90^\circ$  и  $\alpha_p = \pm 10-\pm 20^\circ$ . Для повышения сжимающих остаточных напряжений и механических свойств поверхностного слоя деталей рекомендуются следующие режимы упрочнения:  $S_{пр} = 0,07-0,10$  мм/об;  $n_p = 280-300$  об/мин;  $t = 0,28-0,30$  мм;  $n_p = 290-300$  дв. ход/мин;  $\alpha_n = 90^\circ$  и  $\alpha_p = \pm 55-\pm 60^\circ$ .

**Заключение**

1. По результатам экспериментальных исследований получена система эмпирических управлений, позволяющая определить значение конкретного параметра качества поверхностного слоя в зависимости от параметров и режимов реверсивного выглаживания.

2. С использованием компьютерной программы *Microsoft Visual Studio 2012* установлены рациональные режимы реверсивного выглаживания, обеспечивающие формирование минимально возможных значений микрогеометрических параметров поверхности при реверсивном выглаживании. Для этого установлены следующие режимы обработки:  $S_{пр} = 0,07-0,10$  мм/об;  $n_p = 60-100$  об/мин;  $t = 0,08-0,10$  мм;  $n_p = 115-120$  дв. ход/мин;  $\alpha_n = 90^\circ$  и  $\alpha_p = \pm 10-\pm 20^\circ$ .

3. Для повышения сжимающих остаточных напряжений и механических свойств поверхностного слоя деталей рекомендуются следующие режимы упрочнения:  $S_{пр} = 0,07-0,10$  мм/об;  $n_p = 280-300$  об/мин;  $t = 0,28-0,30$  мм;  $n_p = 290-300$  дв. ход/мин;  $\alpha_n = 90^\circ$  и  $\alpha_p = \pm 55-\pm 60^\circ$ .

Таблица. Рациональные режимы реверсивного выглаживания для достижения показателей качества упрочненных деталей

Table. Rational modes of reverse burnishing to achieve quality indicators for hardened parts

Показатели качества	Интервал варьирования	Режимы упрочнения					
		$S_{пр}$ , мм/об	$n_3$ , об/мин	$t$ , мм	$\alpha_n$ , град	$ \alpha_p $ , град	$n_p$ , дв. ход/мин
$Ra$ , мкм	0,50-0,52	0,07-0,10	60-100	0,07-0,10	90	10-20	115-125
$Wz$ , мкм	5,3-5,5	0,07-0,10	60-100	0,07-0,10	90	10-20	115-125
$\Delta k_p$ , мкм	5,0-5,2	0,07-0,10	60-100	0,07-0,10	90	10-20	115-125
$\sigma_{ост}$ , МПа	340-345	0,07-0,08	280-300	0,25-0,28	90	55-60	270-300
$H$ , HV	465-470	0,07-0,08	280-300	0,25-0,28	90	55-60	270-300
$h$ , мм	1,63-1,65	0,07-0,08	280-300	0,25-0,28	90	55-60	270-300

## Список источников

1. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
2. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
3. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
4. Особенности строения поверхностного слоя деталей машин / Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Малышев Е.Н., Попков В.М. // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. №7-2. С. 51-54.
5. Иноземцев В.Е. Оценка воздействия управляемых входных критериев на качественные характеристики формируемой поверхности деталей // Научные технологии в машиностроении. 2019. №9 (99). С. 12-17.
6. Анализ взаимосвязи параметров поверхностного слоя и эксплуатационных характеристик внутренних поверхностей деталей в процессе их работы / Кожевникова А.А., Блинов В.С., Субочева Е.Ю., Никитин М.В. // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2020. №1 (236). С. 21-24.
7. Черепанов А.П., Ляпустин П.К. Закономерности снижения ресурса уникальных машин // Современные Технологии. Системный Анализ. Моделирование. 2019. №3 (63). С. 37-45.
8. Федоров В.П., Нагоркин М.Н., Пыриков И.Л. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием деталей машин с закономерным изменением качества поверхностных слоев // Вестник Брянского государственного технического университета. 2011. №1 (29). С. 22-31.
9. Торопынин С.И., Медведев М.С. Нанесение защитных покрытий по коррозированным поверхностям деталей машин // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2004. №4. С. 138-141.
10. Федонин О.Н. Технологическое воздействие на коррозионную стойкость поверхностных слоев деталей // Научные технологии в машиностроении. 2012. №9 (15). С. 15-17.
11. Махалов М. С., Блюменштейн В. Ю. Механика процесса поверхностного пластического деформирования. Модель упрочняемого упругопластического тела // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2018. № 4. С. 6-20.
12. A review on plastic deformation induced surface/interface roughening of sheet metallic materials / Ning Nie, Lihong Su, Guanyu Deng, Huijun Li, Hailiang Yu, Anh Kiet Tieu // Journal of Materials Research and Technology. 2021, vol. 15, pp. 6574-6607.
13. Enhancing Surface Integrity of Additively Manufactured Inconel 718 by Roller Burnishing Process / Nihal Yaman, Nedim Sunay, Mert Kaya, Yusuf Kaynak // Science Direct. 2022, vol. 108, pp. 681-686.
14. Кропоткина Е.Ю. Управление качеством нежестких деталей методами поверхностного пластического деформирования // Вестник МГТУ «Станкин». 2011. №2 (14). С. 25-28.
15. Effect of microstructure on the mechanical properties of ultrafine-grained Cu-Al-Ni alloys processed by deformation and annealing / Shuaixin Zhang, Li Wu, Tao Gu, Yucong Shi, Xiaolin Tian, Huanqing Li, Hua Hou, Yuhong Zhao // Journal of Alloys and Compounds. 2022, vol. 923, 166413.
16. Studies on the surface characteristics of Ti60 alloy induced by turning combined with ball burnishing / Kunpeng Han, Liang Tan, Changfeng Yao, Dinghua Zhang, Zheng Zhou // Journal of Manufacturing Processes. 2022, vol. 76, pp. 349-364.
17. Митрофанова К.С. Влияние поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом на структурно-фазовое состояние и микротвердость образцов из стали 45 // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. №3 (151). С. 4-12.
18. Modeling of strengthening mechanisms of surface layers in burnishing process / Reza Teimouri, Marcin Grabowski, Rafał Bogucki, Łukasz S'łusarczyk, Sebastian Skoczypiec // Materials & Design. 2022, vol. 223, 111114.
19. Пат. 2758713 РФ. Способ поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения / Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай, заявл. 14.01.2021; опубл. 01.11.2021. Бюл. № 31.
20. Буй Т.Д., Нгуен Х.Х., Нгуен В.Х. Влияние геометрии тороидального ролика на напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей при реверсивном поверхностном пластическом деформировании // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сб. науч. ст. Всерос. науч.-техн. конф. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2023. С. 98-102.
21. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Влияние параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования на шероховатость упрочненных деталей // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. № 1. С. 120-130.
22. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Влияние реверсивного поверхностного пластического деформирования на параметры волнистости цилиндрических деталей // Научные технологии в машиностроении. 2023. №4 (142). С. 37-48.
23. Хоанг Н.А., Нгуен Х.Х., Нгуен В.Х. Влияние параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования на механические свойства упрочненного слоя цилиндрических деталей // Технологии и техника: пути инновационного раз-

вития: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2023. С. 535-540.

24. Зайдес С.А., Нгуен Хью Хай. Определение остаточных напряжений с использованием шумов Баркгаузена при реверсивном поверхностном пластическом деформировании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 51-61.

### References

- Smelyansky V.M. *Mekhanika uprochneniya detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Mechanics of hardening of parts by surface plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 2002, 300 p. (In Russ.)
- Odintsov L.G. *Uprochnenie i otdelka detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 328 p. (In Russ.)
- Suslov A.G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloya detalei mashin* [The quality of the surface layer of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie, 2000, 320 p. (In Russ.)
- Musokhranov M.V., Kalmykov V.V., Malyshev E.N., Popkov V.M. Features of the structure of the surface layer of machine parts. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii* [Current Trends in the Development of Science and Technology]. 2016;(7-2):51-54. (In Russ.)
- Inozemtsev V.E. Assessing the impact of controlled input criteria on the quality characteristics of the formed surface of parts. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Knowledge Intensive Technologies in Mechanical Engineering]. 2019;(9(99)):12-17. (In Russ.)
- Kozhevnikova A.A., Blinov V.S., Subocheva E.Yu., Nikitin M.V. Analysis of the relationship between the parameters of the surface layer and the operational characteristics of the internal surfaces of parts during their operation. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Izvestiya of Volgograd State Technical University]. 2020;(1(236)): 21-24. (In Russ.)
- Cherepanov A.P., Lyapustin P.K. Patterns of reducing the service life of unique machines. *Sovremennye tekhnologii. Sistemny analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2019; (3(63)):37-45. (In Russ.)
- Fedorov V.P., Nagorkin M.N., Pyrikov I.L. Finishing-hardening treatment by surface plastic deformation of machine parts with a natural change in the quality of surface layers. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Bryansk State Technical University]. 2011; (1(29)):22-31. (In Russ.)
- Toropynin S.I., Medvedev M.S. Application of protective coatings on corroded surfaces of machine parts. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University]. 2004;(4):138-141. (In Russ.)
- Fedonin O.N. Technological impact on the corrosion resistance of surface layers of parts. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Knowledge Intensive Technologies in Mechanical Engineering]. 2012; (9(15)):15-17. (In Russ.)
- Makhalov M.S., Blyumenshtein V.Yu. Mechanics of the process of surface plastic deformation. Model of a strengthened elastoplastic body. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal Working (Technology, Equipment, Tools)]. 2018;(4):6-20. (In Russ.)
- Ning Nie, Lihong Su, Guanyu Deng, Huijun Li, Hailiang Yu, Anh Kiet Tieu. A review on plastic deformation induced surface/interface roughening of sheet metallic materials. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:6574-6607.
- Nihal Yaman, Nedim Sunay, Mert Kaya, Yusuf Kaynak. Enhancing surface integrity of additively manufactured Inconel 718 by roller burnishing process. *Science Direct*. 2022;108:681-686.
- Kropotkina E.Yu. Quality control of non-rigid parts by surface plastic deformation methods. *Vestnik MGTU «Stankin»* [Bulletin of Moscow State University of Technology Stankin]. 2011;(2(14)):25-28. (In Russ.)
- Shuaixin Zhang, Li Wu, Tao Gu, Yucong Shi, Xiaolin Tian, Huanqing Li, Hua Hou, Yuhong Zhao. Effect of microstructure on the mechanical properties of ultrafine-grained Cu-Al-Ni alloys processed by deformation and annealing. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022;923:166413.
- Kunpeng Han, Liang Tan, Changfeng Yao, Dinghua Zhang, Zheng Zhou. Studies on the surface characteristics of Ti60 alloy induced by turning combined with ball burnishing. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;76:349-364.
- Mitrofanova K.S. The influence of surface plastic deformation by a multi-radius roller on the structural phase state and microhardness of samples made from steel 45. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University]. 2022; (3(151)):4-12. (In Russ.)
- Reza Teimouri, Marcin Grabowski, Rafał Bogucki, Łukasz S'łusarczyk, Sebastian Skoczypiec. Modeling of strengthening mechanisms of surface layers in burnishing process. *Materials & Design*. 2022;223:111114.
- Zaides SA, Nguyen Huu Hai. *Sposob poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya naruzhnykh poverkhnostei tel vrashcheniya* [Method for surface plastic deformation of the outer surfaces of bodies of revolution]. Patent RU, no. 2758713, 2021.
- Bui T.D., Nguyen H.H., Nguyen V.H. Influence of toroidal roller geometry on the stress and strain state of cylindrical parts under reverse surface plastic deformation. *Perspektivy razvitiya tekhnologii obrabotki i oborudovaniya v mashinostroenii: sb. nauch. st. Vseros. nauchno-tekhnich. konf.* [Prospects for the

- development of processing technologies and equipment in mechanical engineering. Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conferences]. Voronezh: Publishing House of Voronezh State Technical University, 2023, pp. 98-102. (In Russ.)
21. Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. Influence of parameters of reverse surface plastic deformation on roughness of hardened parts. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh State Technical University]. 2023;19(1): 120-130. (In Russ.)
22. Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. The influence of reverse surface plastic deformation on the parameters of waviness of cylindrical parts. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Knowledge Intensive Technologies in Mechanical Engineering]. 2023;(4(142)):37-48. (In Russ.)
23. Hoang N.A., Nguyen H.H., Nguyen V.H. Influence of parameters of reverse surface plastic deformation on the mechanical properties of the strengthened layer of cylindrical parts. *Tekhnologii i tekhnika. Puti innovatsionnogo razvitiya: sb. nauch. st. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Technologies and equipment: Ways of innovative development. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Voronezh: Publishing House of Voronezh State Technical University, 2023, pp. 535-540. (In Russ.)
24. Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. Determination of residual stresses by using Barkhausen noise in the reverse surface plastic deformation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(3):51-61. (In Russ.)

Поступила 13.11.2023; принята к публикации 18.01.2024; опубликована 27.06.2024  
Submitted 13/11/2023; revised 18/01/2024; published 27/06/2024

**Нгуен Хыу Хай** – аспирант, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: nquan6799@gmail.com. ORCID 0000-0001-7909-385X

**Зайдес Семен Азикович** – доктор технических наук, профессор, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: zsa@istu.edu. ORCID 0000-0001-9416-7749

**Nguyen Huu Hai** – postgraduate student, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Email: nquan6799@gmail.com. ORCID 0000-0001-7909-385X

**Semen A. Zaides** – DrSc (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Email: zsa@istu.edu. ORCID 0000-0001-9416-7749