Polytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 10-21

2025;29(1):10-21

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья УДК 621.77.014 EDN: OUJGOC DOI: 10.21285/1814-3520-2025-1-10-21

# Моделирование и расчёт напряженно-деформированного состояния микропрофиля при ортогональном воздействии в зависимости от условий нагружения

### Н.В. Вулых<sup>1⊠</sup>, Б.Б. Пономарев<sup>2</sup>

<sup>1.2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Цель – установить механику формообразования и напряженное состояние микропрофиля на поверхностях деталей машин при воздействии, сопоставимом с начальной шероховатостью, в зависимости от условий нагружения. В расчетной модели микронеровностей применяли физико-механические характеристики мягкого материала, имитирующего медь. Разработана численная модель осадки микропрофиля на поверхностях деталей машин для различных условий нагружения. Установлено, что увеличение степени стеснения модели микронеровностей при переходе от свободной к стесненной схеме нагружения способствовало повышению: угла у основания деформированного микропрофиля с 35 до 58°, относительной длины сглаженного участка с 0,46 до 0,8, а также вертикального подъема точки впадин микропрофиля с 0,012 до 0,21. При высвобождении фиксации одной из пар боковых поверхностей микропрофиля ортогональная к ней деформировалась в большей степени относительно соответствующей поверхности при свободном закреплении. Максимальная вытяжка образца в направлении оси оХ составила 7%, в направлении оси оZ – 13%. Напряженное состояние под пиками микронеровностей при полной осадке, в зависимости от типа нагружения и расположения микровыступов, составляло от 1050 до 1370 МПа и превысило предел прочности образцов в 5-7 раз. Во впадинах напряженное состояние достигло максимального значения в 1190 МПа для жесткой схемы закрепления и превзошло остальные схемы закрепления в 4-12 раз, с превышением предела прочности образцов в 0,5-6 раз. Наименьшая однородность напряженного состояния по сечению микропрофиля была у образцов со свободным закреплением, наибольшая – у образцов с жестким закреплением. При схеме нагружения с жестким закреплением происходило наиболее качественное выглаживание микропрофиля с формированием более однородного напряженного состояния по сечению микропрофиля. Исследования полезны при назначении условий обработки заготовок локальными способами деформирования, при варьировании степени стесненного нагружения в пределах границ обрабатываемых поверхностей.

**Ключевые слова:** шероховатый слой поверхности, конечно-элементный анализ, стесненное деформирование деталей, напряженное состояние

**Для цитирования:** Вулых Н.В., Пономарев Б.Б. Моделирование и расчёт напряженно-деформированного состояния микропрофиля при ортогональном воздействии в зависимости от условий нагружения // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 1. С. 10–21. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-10-21. EDN: OUJGOC.

#### **MECHANICAL ENGINEERING**

**Original article** 

# Stress-strain state simulation and calculation of a microprofile under orthogonal impact depending on loading conditions

### Nikolay V. Vulykh<sup>1</sup>, Boris B. Ponomarev<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The present study aims to establish the effect of loading conditions on the shaping mechanics and stress-strain state of a surface microprofile for machine parts under the initial roughness impact. The used calculation model of microroughness includes physical and mechanical characteristics of a soft copper-simulating material. A numerical model of microsettlements on the surfaces of machine parts is developed for various loading conditions. The transition from free to restrained loading of the microroughness model increases the angle at the base of the deformed microprofile from 35 to 58°, relative length of the smoothed section from 0.46 to 0.8, and vertical rise of the microprofile depression point from 0.012 to 0.21. For one unfastened pair of side microprofile





Вулых Н.В., Пономарев Б.Б. Моделирование и расчёт напряженно-деформированного состояния микропрофиля...

Vulykh N.V., Ponomarev B.B. Stress-strain state simulation and calculation of a microprofile under orthogonal impact depending...

surfaces, orthogonal pair is deformed to a greater extent relative to the corresponding freely fastened surface. The maximum elongation of the sample in the direction of oX and oZ axes is 7 and 13%, respectively. Depending on loading conditions and location of microprotrusions, the full-settlement stress under the microroughness peaks ranges from 1050 to 1370 MPa exceeding the ultimate strength of the samples by 5-7 times. The stress of depressions on rigidly fastened samples reaches a maximum value of 1190 MPa, which exceeds the values for other fastening options and ultimate strength of the samples by 4-12 and 0.5-6 times, respectively. The lowest stress homogeneity across the microprofile cross-section has been found in freely fastened samples; rigidly fastened samples have the highest stress homogeneity. The optimal microprofile smoothing is typical for rigid fastening loading with a more uniform stress across the microprofile cross-section. The studies are relevant for assigning the conditions of workpiece processing using local deformation methods under the varying degree of restrained loading within the boundaries of the processed surfaces.

Keywords: rough surface layer, finite element analysis, constrained deformation of parts, stress state

**For citation:** Vulykh N.V., Ponomarev B.B. Stress-strain state simulation and calculation of a microprofile under orthogonal impact depending on loading conditions. *iPolytech Journal*. 2025;29(1):10-21. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-10-21. EDN: OUJGOC.

### введение

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) часто применяют для формирования определенных свойств поверхностного слоя почти готовых деталей. Технологии ППД включают локальные способы воздействия (обкатка шариком, роликом, алмазное выглаживание и др.) [1-9]. При локальных ППД увеличение силового воздействия инструмента на заготовку приводит к возрастанию в ней напряженного состояния (НС) – качественной составляющей обработки (при алмазном выглаживании). Однако локализация контактного воздействия инструмента на заготовку приводит к снижению производительности процесса. Другой путь, считающийся современным [4, 10] и интенсифицирующий НС поверхностного слоя заготовки, заключается в применении методики стесненного деформирования [10-16]. При локальных методах ППД могут встречаться различные степени стесненного состояния, например, у границ поверхностей обрабатываемых заготовок, а также не контактирующих с инструментом поверхностей, степень стеснения (СС) будет минимальной, а в случае практической невозможности перемещения металла заготовки при деформировании СС будет приближаться к максимальной – для условия всестороннего сжатия. Деформационное воздействие индентора на микропрофиль происходит ортогонально. В работах [11, 17-22] показано, что для моделирования микропрофиля может быть применим регулярный треугольный микропрофиль, при этом контактирование инструмента происходит по ряду пиков шероховатости.

В статье решена задача по формоизменению микропрофиля заготовки при силовом воздействии на последнюю, с определением напряженно-деформированного состояния микровыступов для различных схем нагружения.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценку напряженно-деформированного состояния микропрофиля [11, 18] выполнили с помощью программного модуля ANSYS Workbench [23].

Деформирование микропрофиля осуществляли по схеме (рис. 1), показывающей динамику деформации микровыступов [11, 17, 18].

Геометрические и механические параметры микропрофиля шириной b – 25 мм (см. рис. 1) и индентора представлены в работах [11, 18]. Материал микропрофиля является пластичным, применяемым для прокладок запорной арматуры с целью герметизации сосудов высокого давления [20, 24–28].

Величина подложки сравнима с высотой микронеровностей [18]. Условия деформирования: свободное, полустесненное двух типов и стесненное.

Условия процесса упругопластической осадки микропрофиля приведены в работах [11, 18].

На рис. 2 представлена конечно-элементная (КЭ) сетка образцов, имеющая сгущение на поверхности, в месте контакта с индентором. А также приведены характеристические точки микропрофиля вершин – а, b, с и впадин – d, e, f, служащих для расчета интенсивности напряжений<sup>2</sup>.

Для различных видов нагружения образцов установлены следующие граничные условия (табл. 1, рис. 3).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности: учеб. пособ. 2-е перераб изд. М.: Высшая школа, 1982. 264 с.

2025. T. 29. № 1. C. 10-21 2025;29(1):10-21

Polytech Journal



**Рис. 1.** Физическая модель нагружения микронеровностей жестким инструментом: 1 – индентор; 2 – бондаж; 3 – образец **Fig. 1.** Physical model of exposing microroughness to the rigid tool impact: 1 – indentor; 2 – device body; 3 – sample



**Рис. 2.** Конечно-элементная сетка образца (число КЭ – 4834, узлов – 23963) **Fig. 2.** Fnite-element grid of a sample (4,834 finite elements, 23,963 nodes)

Таблица 1. Характеристики фиксации образцов	6
<b>Table 1.</b> Fixing characteristics of samples	

Вид нагружения (фиксации) образца											
свободное закрепление	полусвободное закрепление № 1	полусвободное закрепление № 2	жесткое закрепление								
Характер фиксации образца (рис. 3)											
основание образ- ца ограничивали в перемещении по оси оҮ	<ul> <li>основание образца ограничивали в перемещении по оси оҮ и оХ;</li> <li>перемещение по торцам образца ограничивали по оси оХ</li> </ul>	<ul> <li>основание образца ограничивали в перемещении по оси оУ и оZ;</li> <li>перемещение по боковым граням образца ограничивали по оси оZ</li> </ul>	<ul> <li>перемещение по торцам образца ограничивали по оси оХ (Displacement D, E);</li> <li>перемещение по боковым граням ограничивали у образца по оси оZ (Displacement B, C);</li> <li>основание образца полностью фиксировали (Fixed Support F)</li> </ul>								
Тип нагружения (фиксации) образца (рис. 4)											
1	2	3	4								



**Рис. 3.** Характер закрепления и задания нагрузки на микронеровности **Fig. 3.** Nature of fixing and load setting on microroughness

Осадку микропрофиля осуществляли путем ортогонального перемещения индентора на половину исходной высоты микропрофиля h (Joint-Displacement), см. рис. 1, 3 [11, 17, 18].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние типа нагружения (см. табл. 1) модели микронеровностей на относительную длину  $I_D$  сглаженного участка, вертикальное смещение  $I_h$  точки впадин микропрофиля и изменение угла  $\alpha_d$  при основании деформированного микропрофиля [18] представлено на рис. 4, где  $I_D = \frac{D_i}{D}$ ;  $I_h = \frac{S_i}{h}$ ;  $\cos \alpha_d = \frac{D_{2} - \frac{D_i}{2}}{k_i}$ ;  $\varepsilon_h = 100\%$  при h = 6 мм (см. рис. 1, 5).

При максимальной осадке микропрофиля (см. рис. 4) увеличение степени стеснения





**Fig. 4.** Influence of the microroughness model loading type on the relative length of the smoothed section  $I_D - 1$ ; valley vertical displacement  $I_n - 2$ ; microprofile base angle  $\alpha_d - 3$ 



**Рис. 5.** Схема формоизменения модели шероховатости: а – недеформированный профиль, b – профиль после i-го деформирования; D – длина единичного выступа микропрофиля, мм; D<sub>i</sub> – длина сглаженного участка микропрофиля после i-го деформирования, мм; h – высота микропрофиля, мм; S<sub>i</sub> – величина подъема впадины после i-го деформирования, мм; α<sub>d</sub> – угол при основании деформированного микропрофиля, град

**Fig. 5.** Diagram of microroughness model form change: a - unstrained microprofile; b - microprofile after the i-th strain; D - length of a microprofile single protrusion, mm;  $D_i -$  length of the microprofile smoothed section after the i-th strain, mm; h - microprofile height, mm;  $S_i -$  valley elevation after the i-th strain, mm;  $\alpha_d -$  angle at the strained microprofile base, deg.

https://ipolytech.elpub.ru

#### ISSN 2782-4004 (print)

# **iPolytech Journal**

#### 2025. T. 29. № 1. C. 10-21 2025:29(1):10-21

ISSN 2782-6341 (online)

модели микронеровностей способствует повышению угла у основания деформированного микропрофиля, относительной длины сглаженного участка и вертикального подъема точки впадин микропрофиля. Это указывает на то, что чем больше стеснен микропрофиль, тем сильнее деформируются его микровыступы. Установлено, что ограничение бокового перемещения микропрофиля по оси оХ (тип нагружения 2) не привело к существенному изменению геометрии деформированного микропрофиля относительно свободной схемы закрепления (тип нагружения 1). Ограничение бокового перемещения микропрофиля по оси оZ (тип нагружения 3) способствовало значительному подъему точки впадины (с 0,012 до 0,12) и в меньшей степени – увеличению относительной длины сглаженного участка микропрофиля (с 0,46 до 0,6) и повышению угла у основания деформированного микропрофиля (с 35 до 39°). Жесткое закрепление микропрофиля (тип нагружения 4) привело к подъему точки впадины до 0,21, возрастанию относительной длины сглаженного участка микропрофиля до 0,8, и увеличению угла у основания деформированного микропрофиля до 58°.

На рис. 6 показаны половины изополос деформированного микропрофиля – для выступов 1, 2 и 3 (см. рис. 3) [5, 8]. Изополосы показаны для вертикального (оҮ) и горизонтальных (оХ) и (оZ) направлений деформирования микронеровностей до степени осадки (ɛ<sub>h</sub>) равной 50%.



**Рис. 6.** Участки распределения пластических деформаций микропрофиля: a - направление oX, тип нагружения 1,  $\varepsilon_h = 50\%$ ; b - направление oY, тип нагружения 3,  $\varepsilon_h = 50\%$ ; d - направление oY, тип нагружения 3,  $\varepsilon_h = 50\%$ ; d - направление oY, тип нагружения 3,  $\varepsilon_h = 50\%$ ; e - направление oZ, тип нагружения 2,  $\varepsilon_h = 50\%$ ; f - направление oZ, тип нагружения 1,  $\varepsilon_h = 50\%$ **Fig. 6.** Distribution areas of microprofile plastic deformations: a - oX direction, loading type 1,  $\varepsilon_h = 50\%$ ; b - oY direction, loading type 1,  $\varepsilon_h = 50\%$ ; c - oZ direction, loading type 3,  $\varepsilon_h = 50\%$ ; d - oY direction, loading type 3,  $\varepsilon_h = 50\%$ ; d - oZ direction, loading type 2,  $\varepsilon_h = 50\%$ ; f - oZ direction, loading type 1,  $\varepsilon_h = 50\%$ ; d - OZ direction, loading type 1,  $\varepsilon_h = 50\%$ ; d - OZ direction, loading type 1,  $\varepsilon_h = 50\%$ ; d - OZ direction, loading type 1,  $\varepsilon_h = 50\%$ ; d - OZ direction, loading type 1,  $\varepsilon_h = 50\%$ ; d - OZ direction, lo

Анализ изополос пластического формоизменения микровыступов в трех направлениях показал: для жесткого закрепления (тип нагружения 4 на рис. 6 не представлен, подобные изополосы рассмотрены в [11, 18]) площадь пустот осталась незначительной, при этом глубина пустот составила около 1,7 мм 28% от первоначальной высоты профиля. Для свободного закрепления (тип нагружения 1) подъем точки впадины практически не наблюдался, см. рис. 4 и 6 b, при этом глубина пустот составила около 2,9 мм – 48% от исходной высоты профиля, что явилось следствием вытягивания образца в направлении оси оХ и уширением в направлении оси оZ, см. рис. 6 a, f. Для остальных схем нагружения подъем точки впадины и глубина пустот микропрофиля имели промежуточное значение между жестким и свободным закреплением, см. рис. 4, 6. Раздача образцов в направлении оси оZ (см. рис. 6 е, f) имела следующий характер: раздача крайних пиков микропрофиля произошла в меньшей степени, чем у центральных (тип нагружения 1), что может быть следствием свободного течения металла в направлении оси оХ. При полусвободном закреплении (тип нагружения 2) пластическое течение металла имело симметричный характер, а также превышало соответствующую величину для свободной схемы закрепления.

Изменение граничных условий закрепления (высвобождение боковых сторон микропрофиля) внесло значительное изменение в характер деформирования.

В табл. 2 представлена величина вытяжки боковых сторон микропрофиля в направлении оси оХ и уширения боковых сторон микропрофиля в направлении оси оZ при  $\varepsilon_h$  = 50%.

Вытяжку образцов микропрофиля в направлении оси оХ оценивали, соответственно, как 2*ΔI/I*×100%, уширение боковых сторон микропрофиля в направлении оси оZ оценивали как 2*Δb/b*×100%, см. рис. 1. Анализируя характер смещения боковых сторон микропрофиля, можно заключить, что при высвобождении фиксации одной из пар боковых поверхностей микропрофиля ортогональная к ней деформировалась в большей степени относительно соответствующей поверхности при свободной схеме закрепления. При жестком закреплении выдавливание металла происходило навстречу движению индентора [11, 18].

Величину упрочнения материала σ<sub>i</sub> (МПа) микропрофиля определяли по интенсивности напряжений<sup>2</sup>:

$$\sigma_{i} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{(\sigma_{x} - \sigma_{y})^{2} + (\sigma_{y} - \sigma_{z})^{2} + }{(\sigma_{z} - \sigma_{x})^{2} + 6(\tau_{xy}^{2} + \tau_{yz}^{2} + \tau_{xz}^{2})}}.$$

На рис. 7 показано влияние степени осадки микронеровностей  $\varepsilon_h$  на интенсивность напряжений  $\sigma_i$  для свободного и жесткого закрепления микропрофиля (см. рис. 2, табл. 1).

На рис. 8 представлено влияние типа нагружения модели микронеровностей на интенсивность напряжений  $\sigma_i$  для микровыступов 1, 2 и 3 при их осадке на 50% (см. рис. 2, 3, табл. 1).

Изополосы интенсивности напряжений микронеровностей *о*, представлены на рис. 9 при деформировании на 50% для исследуемых схем нагружения (см. табл. 2).

Возрастание осадки микропрофиля (см. рис. 7) приводит к увеличению интенсивности напряжений. Следует отметить, что до величины осадки в 20% НС под пиками возрастает сильнее (особенно для жесткого закрепления), затем интенсивность возрастания падает. На протяжении деформирования в 5–35% НС для жесткого закрепления превышает НС остальных схем закрепления микропрофиля. У последних наблюдался спад увеличения НС при осадке в 5–10%, затем градиент интенсивности возрастания

**Таблица 2.** Величина вытяжки и уширения боковых сторон микропрофиля **Table 2.** Value of microprofile sides drawing and widening

Вид нагружения (фиксации) образца										
свободное закрепление		полусвободное закрепление № 1		полусвободное закрепление № 2		жесткое закрепление				
Перемещение по осям, %										
οХ	οZ	οХ	οZ	οХ	οZ	οХ	οZ			
4	11	0	13	7	0	0	0			



**Рис. 7.** Влияние степени деформирования микропрофиля на максимальную интенсивность напряжений: а – под вершиной микропрофиля: 1 – т. а (свободное закрепление); 2 – т. b (свободное закрепление); 3 – т. с (свободное закрепление); 4 – т. а, b, с (жесткое закрепление); b – под впадиной микропрофиля: 1 – т. d (свободное закрепление); 2 – т. е (свободное закрепление); 3 – т. f (свободное закрепление); 4 – т. d, е, f (жесткое закрепление)

Fig. 7. Influence of microprofile deformation degree on maximum stress intensity: a – under the microprofile peak:

1 – m. a (free fixing); 2 – m. b (free fixing); 3 – m. c (free fixing); 4 –m. a, b, c (rigid fixing);

b - under the microprofile valley: 1 - m. d (free fixing); 1 - m. e (free fixing); 1 - m. f (free fixing); 4 - m. d, e, f (rigid fixing)



**Рис. 8.** Влияние типа нагружения модели микронеровностей на максимальную интенсивность напряжений для микровыступов 1, 2 и 3: а – под вершиной микропрофиля (т. a, b, c); b – под впадиной микропрофиля (т. d, e, f) **Fig. 8.** Influence of the microroughness model loading type on maximum stress intensity for microprotrusions 1, 2 and 3: a – under the microprofile peak (m. a, b, c); b – under the microprofile valley; (m. d, e, f)

увеличился. Необходимо отметить, что НС у полусвободных схем закрепления незначительно превысило (порядка 70–100 МПа) НС жесткой схемы закрепления на конечном этапе осадки. Увеличение НС под впадинами микронеровностей имело практически линейный характер для сводной и полусвободных схем закрепления. У жесткой схемы закрепления после 5% осадки градиент интенсивности возрастания был выше остальных схем закрепления и при осадке в 50% превосходил их по НС в 4–12 раз. Характер изменения НС под вершинами и впадинами микровыступов представлен на рис. 8. Видно (см. рис. 8), что максимальное значение НС под вершинами наблюдалось у второго типа нагружения, являлось одинаковым по всем микровыступам и составило порядка 1370 МПа. Для жесткого закрепления (тип нагружения 4) микропрофиля НС составило порядка 1170 МПа, и также было одинаково по всем микровыступам. Под впадинами микровыступов максимальное значение НС наблюдалось у



**Рис. 9.** Участки распределения интенсивности напряжений микропрофиля от ( $\epsilon h = 50\%$ ): а – свободное закрепление; b – полусвободное закрепление № 1; с – полусвободное закрепление № 2; d – жесткое закрепление **Fig. 9.** Distribution areas of  $\sigma_i$  microprofile stress intensity ( $\epsilon_h = 50\%$ ): а – free fixing; b – semi-free fixing no.1; с – semi-free fixing no.2; d – rigid fixing

жесткого закрепления, было одинаковым по всем микровыступам и составляло порядка 1190 МПа. Разброс НС по микровыступам присутствовал у свободной схемы закрепления, а также у стесненной по оси оZ. Причем в обоих случаях увеличение НС наблюдалось при движении от крайнего микровыступа 1 к центральному 3 (см. рис. 3). Исключение составила средняя зона под третьим пиком микровыступа (тип нагружения 3), у которого НС составило порядка 1050 МПа и было меньше примерно на 100 МПа относительно 1 и 2 микровыступов.

При осадке микропрофиля в 50% равномерное распределение HC по микровыступам наблюдалось при полусвободном закреплении № 1, а также при жестком закреплении. Однако при полусвободном закреплении № 1 перепад HC под пиком и впадиной составил порядка 950 МПа (см. рис. 8), причем HC было сконцентрировано у вершин микропрофиля. При жестком закреплении микропрофиля перепад HC под пиком и впадиной составил около 20 МПа (см. рис. 8), при этом распределение HC по сечению микровыступов было более однородным (см. рис. 9). Для свободной и полусвободной схемы закрепления № 2 HC имело неравномерное распределение по микровыступам и в области впадин (см. рис. 9). Однородность НС по сечению микропрофиля возрастала в следующей последовательности: свободное закрепление, полусвободное закрепление № 2, полусвободное закрепление № 1, жесткое закрепление (см. табл. 2, рис. 8, 9). Таким образом, теоретически формирование НС в поверхностном слое заготовки при обработке локальным ППД может снижаться у границ обрабатываемых поверхностей.

Установлено, что у схемы нагружения с жестким закреплением происходит наиболее качественное выглаживание микропрофиля с формированием более однородного HC по сечению микропрофиля. Данная схема нагружения теоретически может являться наиболее эффективной при локальных способах обработки деталей машин ППД.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Увеличение степени стеснения модели микронеровностей, характеризующейся ограниченной подвижностью ее боковых граней и основания, при переходе от свободной к стесненной схеме нагружения способствовало повышению угла у основания деформированного микропрофиля

# **Polytech Journal** $\frac{2025.1.23.10}{2025;29(1):10-21}$

ISSN 2782-6341 (online)

с 35 до 58°, относительной длины сглаженного участка с 0,46 до 0,8, а также вертикального подъема точки впадин микропрофиля с 0,012 до 0,21.

2. При высвобождении фиксации одной из пар боковых поверхностей микропрофиля ортогональная к ней деформировалась в большей степени относительно соответствующей поверхности при свободном закреплении. Максимальная вытяжка образца в направлении оси оХ составила 7%, в направлении оси оZ – 13%.

3. НС под пиками микронеровностей при полной осадке, в зависимости от типа нагружения и расположения микровыступов, составляло от 1050 до 1370 МПа и превысило

предел прочности образцов в 5-7 раз. Во впадинах напряженное состояние достигло максимального значения в 1190 МПа для жесткой схемы закрепления и превзошло остальные схемы закрепления в 4-12 раз, с превышением предела прочности образцов в 0,5-6 раз.

4. Наименьшая однородность HC по сечению микропрофиля была у образцов со свободным закреплением, наибольшая – у образцов с жестким закреплением.

5. При схеме нагружения с жестким закреплением происходит наиболее качественное выглаживание микропрофиля с формированием более однородного НС по сечению микропрофиля.

#### Список источников

1. Зайдес С.А. Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 3. С. 129–139. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139. EDN: YARHJB.

2. Зайдес С.А., Машуков А.Н. Применение технологии алмазного выглаживания для улучшения микрогеометрии затворных узлов арматуры высокого давления // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2019. № 1. С. 5–14. https://doi.org/10.26730/1999-4125-2019-1-5-13. EDN: NVOUGP.

3. Kuznetsov V., Smolin I., Skorobogatov A., Akhmetov A. Finite element simulation and experimental investigation of nanostructuring burnishing AISI 52100 steel using an inclined flat cylindrical tool // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. Iss. 9. P. 5324. https://doi.org/10.3390/app13095324. EDN: RHXGFE.

4. Нго Као Кыонг, Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Оценка качества упрочненного слоя при поверхностном пластическом деформировании роликами разных конструкций // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 30–37. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-30-37. EDN: YMMWDW. 5. Кроха В.А. Кривые упрочения металлов при холодной деформации. М.: Машиностроение, 1968. 131 с. EDN: SHJAKZ.

6. Блюменштейн В.Ю., Митрофанова К.С. Исследование влияния технологических факторов процесса поверхе ностного пластического деформирования сложно профильным инструментом на качество поверхностного слоя // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 2. С. 68–74. EDN: BZXTEC.

7. Махалов М.С., Блюменштейн В.Ю. Механика процесса ППД. Остаточные напряжения в упрочняемом упругопластическом теле // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2019. Т. 21. № 2. С. 110–123. https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.2-110-123. EDN: IZSBDL.

8. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.

9. Grzesik W., Zak K. Characterization of surface integrity produced by sequential dry hard turning and ball burnishing operations // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2014. Vol. 136. Iss. 3. P. 031017. https://doi.org/ 10.1115/1.4026936.

10. Зайдес С.А., Нго Као Кыонг. Влияние поверхностного пластического деформирования в стесненных условиях на качество упрочненного слоя // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 11. С. 491–494. EDN: ZRQVHX.

11. Вулых Н.В., Вулых А.Н. Моделирование и расчёт упругопластической деформации микропрофиля при ортогональном стесненном нагружении // Вестник машиностроения. 2022. № 7. С. 80–84. https://doi.org/ 10.36652/0042-4633-2022-7-80-84. EDN: DRTPLH.

12. Зайдес С.А., Нго Као Кыонг. Технологическая интенсификация напряженного состояния в стесненных условиях локального нагружения // Вестник машиностроения. 2017. № 3. С. 5–8. EDN: YUPOWT.

13. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Интенсификация напряженного состояния в очаге деформации при локальном воздействии деформирующего инструмента // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 580–592. https://doi.org/ 10.21285/1814-3520-2022-4-580-592.

14. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Оценка геометрических параметров отпечатка и давления в зоне контакта рабочего инструмента при реверсивном поверхностном пластическом деформировании // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 3. С. 34–45. https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-3-34-45. EDN: GBGOIO.

#### Вулых Н.В., Пономарев Б.Б. Моделирование и расчёт напряженно-деформированного состояния микропрофиля...

Vulykh N.V., Ponomarev B.B. Stress-strain state simulation and calculation of a microprofile under orthogonal impact depending...

15. Zaides S.A., Pham Van Anh. Improvement of calibrated steel quality by surface deformation. Part 1: Determination of the stress state of cylindrical parts during orbital surface deformation // Steel in Translation. 2020. Vol. 50. Iss. 11. P. 745–749. https://doi.org/10.3103/S0967091220110145. EDN: QMCCKG.

16. Zaides S.A., Le Hong Quang. State of stress in cylindrical parts during transverse straightening // Russian Metallurgy (Metally). 2019. Vol. 2019. Iss. 13. P. 1487–1491. https://doi.org/10.1134/S003602951913041X. EDN: EDNMKQ.

17. Vulykh N.V., Vulykh A.N. Computer simulation of microprofile strain under orthogonal impact at constrained load. Part 1 // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds. A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov. Cham: Springer, 2021. Part 1. P. 891–899. https://doi.org/ 10.1007/978-3-030-54817-9\_103.

18. Вулых Н.В., Вулых А.Н. Численный расчет напряженно-деформированного состояния микропрофиля при ори тогональном воздействии в условиях стесненного нагружения // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 538–548. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-538-548. EDN: EKZXRF.

19. Vulykh N.V. Centrifugal rolling of flexible shafts for achieving best possible roughness of the surface // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds. A. Radionov, O. Kravchenko, V. Guzeev, Y. Rozhdestvenskiy. Cham: Springer, 2020. Vol. 2. P. 1079–1088. https://doi.org/ 10.1007/978-3-030-22063-1\_115.

20. Лившиц О.П., Гридин Г.Д., Древин А.К. Влияние технологических факторов изготовления уплотнительных элементов на герметичность затворов сосудов высокого давления // Вестник машиностроения. 1978. № 11. С. 28–30.

21. Демкин Н.Б. Контактирование шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 227 с. EDN: YKDVDD.

22. Шнейдер Ю.Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. Л.: Машиностроение, 1972. 240 с.

23. Chen Xiaolin, Liu Yiijun. Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench: CRC Press, 2014. 411 p.

24. Nikolaeva E.P., Mashukov A.N. Evaluation of residual stresses in high-pressure valve seat surfacing // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. Vol. 53. Iss. 7-8. P. 459–463. https://doi.org/10.1007/s10556-017-0363-1.

25. Gridin G.D. New in development of high-pressure angle shutoff valves // Chemical and Petroleum Engineering. 2012. Vol. 47. Iss. 9-10. P. 683–686. https://doi.org/10.1007/s10556-012-9532-4.

26. Pogodin V.K., Belogolov Yu.I., Gozbenko V.E., Kargapoltsev S.K., Olentsevich V.A., Gladkih A.M. Calculation of sealing pressures of shut-off valves // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2021. Vol. 1064. lss. 1. P. 012035. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012035.

27. Serebrennikova A.G., Nikolaeva E.P, Savilov A.V., Timofeev S.A., Pyatykh A.S. Research results of stressstrain state of cutting tool when aviation materials turning // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 944. Iss. 1. P. 012104. https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012104.

28. Никитин Г.С., Галкин М.П., Жихарев П.Ю. Влияние внеконтактных зон на усилия деформирования в процессах обработки металлов давлением // Металлург. 2012. № 10. С. 61–65. EDN: PPLSWX.

#### References

1. Zaides S.A. New surface plastic deformation techniques in the manufacture of machine parts. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2018;16(3):129-139. (In Russ.). https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139. EDN: YARHJB.

2. Zaides S.A., Mashukov A.N. Application of diamond smoothing technology to improve the microgeometry of the valves of high pressure piping. *Bulletin of the Kuzbass state technical university*. 2019;1:5-14. (In Russ.). https://doi.org/ 10.26730/1999-4125-2019-1-5-13. EDN: NVOUGP.

3. Kuznetsov V., Smolin I., Skorobogatov A., Akhmetov A. Finite element simulation and experimental investigation of nanostructuring burnishing AISI 52100 steel using an inclined flat cylindrical tool. *Applied Sciences*. 2023;13(9):5324. https://doi.org/10.3390/app13095324. EDN: RHXGFE.

4. Ngo Cao Cuong, Zaides S.A., Le Hong Quang. Hardened layer quality evaluation at surface plastic deformation by rollers of different designs. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(1):30-37. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-30-37. EDN: YMMWDW.

5. Krokha V.A. *Curves of metal hardening under cold deformation*. Moscow: Mashinostroenie; 1968, 131 p. (In Russ.). EDN: SHJAKZ.

6. Blumenshtein V.Yu., Mitrofanova K.S. Study on effect of technological factors of surface plastic deformation process by complex-profile tool on quality of surface layer. *Strengthening Technologies and coatings*. 2020;16(2):68-74. (In Russ.). EDN: BZXTEC.

7. Makhalov M.S., Blumenstein V.Yu. Surface plastic deformation mechanics. The residual stresses in the hardened elastic-plastic body. *Metal Working and Material Science*. 2019;21(2):110-123. (In Russ.). https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.2-110-123. EDN: IZSBDL.

8. Papshev D.D. *Finishing and hardening treatment by surface plastic deformation*. Moscow: Mashinostroenie; 1978, 152 p. (In Russ.).

https://ipolytech.elpub.ru ·

## iPolytech Journal

2025;29(1):10-21

ISSN 2782-6341 (online)

9. Grzesik W., Zak K. Characterization of surface integrity produced by sequential dry hard turning and ball burnishing operations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2014;136(3):031017. https://doi.org/ 10.1115/1.4026936.

10. Zaides S.A., Ngo Kao Kyong. Influence of surface plastic deformation in cramped conditions on surface layer quality. *Strengthening Technologies and coatings*. 2017;13(11):491-494. (In Russ.). EDN: ZRQVHX.

11. Vulykh N.V., Vulykh A.N. Modeling and calculation of elastic-plastic microprofile deformation under orthogonal constrained loading. *Russian Engineering Research*. 2022;7:80-84. (In Russ.). https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-7-80-84. EDN: DRTPLH.

12. Zaides S.A., Ngo Kao Kyong. Technological intensification of the stress state in confined conditions of local loading. *Russian Engineering Research*. 2017;3:5-8. (In Russ.). EDN: YUPOWT.

13. Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. Intensification of stress state at deformation site under local action of a deformation tool. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):580-592. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-580-592.

14. Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. Evaluation of the imprint geometric parameters and pressure in the working tool contact zone under the reversible surface plastic deformation. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2023;3:34-45. (In Russ.). https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-3-34-45. EDN: GBGOIO.

15. Zaides S.A., Pham Van Anh. Improvement of calibrated steel quality by surface deformation. Part 1: Determination of the stress state of cylindrical parts during orbital surface deformation. *Steel in Translation*. 2020;50(11):745-749. https://doi.org/10.3103/S0967091220110145. EDN: QMCCKG.

16. Zaides S.A., Le Hong Quang. State of stress in cylindrical parts during transverse straightening. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019;2019(13):1487-1491. https://doi.org/10.1134/S003602951913041X. EDN: EDNMKQ. 17. Vulykh N.V., Vulykh A.N. Computer simulation of microprofile strain under orthogonal impact at constrained load. Part 1. In: Radionov A. A., Gasiyarov V. R. (eds.). *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering*. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer; 2021, part 1, p. 891-899. https://doi.org/ 10.1007/978-3-030-54817-9\_103.

18. Vulykh N.V., Vulykh A.N. Stress-strain numerical simulation for a microprofile subjected to orthogonal impact under constrained loading conditions. *iPolytech Journal.* 2021;25(5):538-548. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-538-548. EDN: EKZXRF.

19. Vulykh N.V. Centrifugal rolling of flexible shafts for achieving best possible roughness of the surface. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds.). *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Cham: Springer; 2020. Vol. 2. P. 1079-1088. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1\_115.

20. Livshits O.P., Gridin G.D., Drevin A.K. Influence of technological factors of sealing element manufacturing on high-pressure vessel seal tightness. *Russian Engineering Research*. 1978;11:28-30. (In Russ.).

21. Demkin N.B. Rough surface contacting. Moscow: Nauka; 1970, 227 p. (In Russ.). EDN: YKDVDD.

22. Schneider Y.G. Formation of regular microreliefs on parts and their operation properties. Leningrad: Mashinostroenie; 1972, 240 p. (In Russ.).

23. Chen Xiaolin, Liu Yiijun. Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench: CRC Press; 2014, 411 p.

24. Nikolaeva E.P., Mashukov A.N. Evaluation of residual stresses in high-pressure valve seat surfacing. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017;53(7-8):459-463. https://doi.org/10.1007/s10556-017-0363-1.

25. Gridin G.D. New in development of high-pressure angle shutoff valves. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2012;47(9-10):683-686. https://doi.org/10.1007/s10556-012-9532-4.

26. Pogodin V.K., Belogolov Yu.I., Gozbenko V.E., Kargapoltsev S.K., Olentsevich V.A., Gladkih A.M. Calculation of sealing pressures of shut-off valves. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2021;1064(1):012035. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012035.

27. Serebrennikova A.G., Nikolaeva E.P, Savilov A.V., Timofeev S.A., Pyatykh A.S. Research results of stressstrain state of cutting tool when aviation materials turning. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;944(1):012104. (In Russ.). https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012104.

28. Nikitin G.S., Galkin M.P., Zhikharev P.Yu. Effect of out-of-contact zones on deforming forces at metal forming processes. *Metallurg.* 2012;10:61-65. (In Russ.). EDN: PPLSWX.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Вулых Николай Валерьевич,

к.т.н., доцент, доцент кафедры материаловедения сварочных и аддитивных технологий, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия Vulix2011@yandex.ru https://orcid.org/0000-0002-2607-4302

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Nikolay V. Vulykh,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia ⊠ vulix2011@yandex.ru https://orcid.org/0000-0002-2607-4302

#### Пономарев Борис Борисович,

д.т.н., профессор,
начальник управления по дополнительному
образованию и социальной работе,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
pusw@ex.istu.edu
https://orcid.org/0000-0003-1185-8638

#### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### Информация о статье

Статья поступила в редакцию 16.01.2024 г.; одобрена после рецензирования 20.03.2024 г.; принята к публикации 09.09.2024 г.

Boris B. Ponomarev,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Industries, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia pusw@ex.istu.edu https://orcid.org/0000-0003-1185-8638

#### **Authors' contribution**

The authors contributed equally to this article.

#### **Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

#### Information about the article

The article was submitted 16.01.2024; approved after reviewing 20.03.2024; accepted for publication 09.09.2024.