ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья УДК 621.787

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-59-71

# РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ, ФОРМИРУЮЩЕГОСЯ ПРИ ОБКАТЫВАНИИ РОЛИКОМ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Учайкин Сергей Евгеньевич\* Блюменштейн Валерий Юрьевич

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

#### Аннотация

Разработана методика оценки очага деформации (ОД), определения геометрических параметров и расчета накопленной степени деформации сдвига на разных участках сложнопрофильной поверхности при обкатывании роликами. Конструктивные элементы, такие как шпоночные и шлицевые пазы, галтельные переходы между ступенями, проточки, резьбы и др., являются концентраторами напряжений, которые отрицательно влияют на эксплуатационные свойства деталей. В большинстве случаев валы подвержены воздействию циклических знакопеременных нагрузок, поэтому обеспечение требуемой циклической долговечности или ее повышение является актуальной задачей. Анализ показал, что одним из доступных методов, не требующих дорогостоящего оборудования и метод поверхностного пластического оснастки, является деформирования (ППД) обкатыванием роликами. На взгляд авторов выявление закономерностей стационарности течения металла в поверхностном слое  $(\Pi C)$ при обкатывании сложнопрофильных поверхностей позволит решить эту задачу. При подготовке к проведению основных экспериментов по исследованию разных трансформации очага деформации на сложнопрофильной поверхности при обкатывании роликами выполнен отладочный эксперимент, в котором рассматривались способы оценки геометрических параметров ОД (осевых и высотных) и расчет накопленной степени деформации сдвига. Для расчета последней предложено использовать известную модель, в которой неизвестными являются геометрические параметры очага деформации. Для определения горизонтальных и вертикальных параметров очага деформации предложено 2 способа, которые показали схожие результаты. Результаты расчета накопленной степени деформации сдвига сопоставимы с результатами других авторов, свидетельствует о возможности применения разработанной методики.



**Информация о статье** Поступила: 04 апреля 2025 г.

Одобрена после рецензирования: 10 июня 2025 г.

Принята к публикации: 20 июня 2025 г.

Опубликована: 26 июня 2025 г.

# Ключевые слова:

сложнопрофильные валы, поверхностное пластическое деформирование, обкатывание, очаг деформации, степень деформации сдвига.

**Для цитирования:** Учайкин С.Е., Блюменштейн В.Ю. Разработка методики оценки очага деформации, формирующегося при обкатывании роликом сложнопрофильных поверхностей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 3 (169). С. 59-71. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-59-71, EDN: PPFUXS

#### Введение

Одними из основных компонентов различных агрегатов в разных отраслях промышленности являются валы. Большая часть валов имеет

сложную геометрическую форму поверхности, которая включает в себя такие элементы, как шпоночные и шлицевые пазы, галтельные

<sup>\*</sup> для корреспонденции: uchaikinse@kuzstu.ru

переходы между ступенями, проточки, резьбы и др.

В процессе эксплуатации вследствие воздействия циклических нагрузок валы подвержены усталостному разрушению. Минимизировать влияние концентраторов напряжений на циклическую долговечность используя различные можно. технологии [1-12]. Одним из доступных упрочнения не дорогостоящего требующих методов, оборудования и оснастки, является метод поверхностного пластического деформирования (ППД), включая обкатывание поверхности валов роликами или шариками [11-12].

Процесс обкатывания цилиндрических поверхностей достаточно хорошо изучен [11-14]. Отмечается, что важно сохранять стабильность технологических режимов; так, цилиндрической обкатывании поверхности роликом стационарный процесс течения металла возникает спустя несколько оборотов детали И сохраняется протяжении всего процесса. стационарности судят по геометрии очага деформации, возникающего в зоне контакта деформирующего инструмента с деталью. Имея информацию о геометрии очага деформации при обработке той или иной поверхности детали, можно выявить закономерности течения пластического металла, выполнить расчеты напряженнодеформированного состояния металла и качества поверхностного слоя детали.

А. С. Чайкиным предлагается оценка очага деформации геометрии технологических процессах поверхностного пластического деформирования определение площади контактного отпечатка [15]. За основу предлагаемой методики расчета положен способ Симпсона. задача конечном счете сводится определению величин ординат в дискретном наборе абсцисс. По мнению автора, данная методика существенно упрощает

методика существенно упрощает процесс расчета с обеспечением необходимой точности. Общая модель для определения площади контактного отпечатка для внутренних цилиндрических поверхностей имеет вид:

$$2S_{\text{TP}} = \frac{1}{2} \left[ \left( R_{\text{II}} - R_{\text{P}} + R_{\text{H}}(x) + R_{\text{A}}(x) + \Delta h \right) \times \left( R_{\text{II}} - R_{\text{P}} - R_{\text{H}}(x) + R_{\text{A}}(x) + \Delta h \right) \times \left( R_{\text{II}} - R_{\text{P}} + R_{\text{H}}(x) - R_{\text{A}}(x) + \Delta h \right) \times \left( -R_{\text{II}} + R_{\text{P}} + R_{\text{H}}(x) + R_{\text{A}}(x) - \Delta h \right) \right]^{\frac{1}{2}},$$

где  $R_{\rm II}$  — радиус исходной цилиндрической поверхности до обработки ППД;  $R_{\rm P}$  — радиус деформирующего ролика;  $R_{\rm II}(x)$  — радиус индентора, рассеченного секущей плоскостью, отстоящей от начала отсчета системы координат на величину абсциссы x;  $R_{\rm II}(x)$  — радиус детали, рассеченный этой же секущей плоскостью,

соответственно, в набегающей и сбегающей точках контакта с индентором;  $\Delta h$  — величина обжатия исходного микропрофиля, мкм. Знак «минус» перед  $R_{\rm P}$  и «плюс» перед  $\Delta h$  соответствует обработке внутренней цилиндрической поверхности, а обратные знаки — наружных цилиндрических поверхностей.

Позже было установлено, что при больших усилиях обработки оценка площади контакта давала погрешность до 30% [16]. Путем снятия профилограмм с полученных отпечатков и ряда преобразований и допущений получено суммарное выражение фактической площади

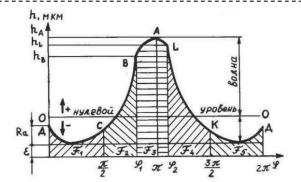
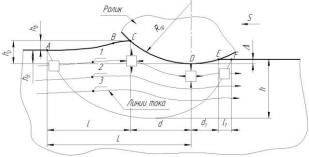


Рис. 1. Диаграмма развертки отпечатка очага деформации

Fig. 1. Diagram of the deformation zone imprint scan



Puc. 2. Схема очага деформации при обработке ППД Fig. 2. Scheme of the deformation zone during SPD processing

контакта:

$$\begin{split} F_{\rm K} &= \frac{h_L - \varepsilon}{2} \cos^{-1} \left( 1 - \frac{s}{\sqrt{2Rh_A}} \right) + \frac{h_{\rm B} - \varepsilon}{2} \cos^{-1} \sqrt{\frac{h_L - \varepsilon}{h_{\rm A} - \varepsilon}} + \\ &\pi \varepsilon + \frac{\pi}{2} h_{\rm J} + \frac{\pi}{4} \left( h_{\rm B} + h_{\rm J} \right) \,, \end{split}$$

где  $h_L$ ,  $h_B$ ,  $h_{\Brokenty}$  и  $h_A$  — ординаты соответствующих точек на диаграмме развертки отпечатка очага деформации (Рис. 1);  $\varepsilon$  — величина пластического оттеснения деформируемого металла в сторону обработанной поверхности образца; S — подача инструмента; R — профильный радиус инструмента.

В трудах В. М. Смелянского и его учеников выполнены комплексные научные исследования формирования и трансформации профиля очага деформации (ОД), влияния режимов (усилия, профильного радиуса, подачи, скорости и др.) и свойств материала на основные геометрические

параметры. Предложена схема ОД в меридиональном сечении (плоскости подачи инструмента) (Рис. 2) [13, 17].

Схема рассматривается в осевом сечении вала, в котором расположена плоскость главных деформаций. На профиле очага деформации выделены следующие характерные точки, линии и области:  $h_{\partial}$  – действительный натяг, равный глубине внедрения инструмента;  $h_{\scriptscriptstyle B}$  – высота упругопластической волны перед деформирующим инструментом;  $h_p = h_{\partial} + h_{\varepsilon}$  – расчетный натяг, равный вертикальной проекции передней дуги контакта;  $\Delta$  – высота упругопластического восстановления металла за деформирующим инструментом; d – длина горизонтальной проекции передней дуги контакта CD (длина передней контактной зоны очага деформации);  $d_1$  – горизонтальной проекции задней контакта DE (длина задней контактной зоны очага деформации); l – длина волны перед деформирующим инструментом АВС (длина передней внеконтактной зоны деформации); L = l + d – длина передней зоны очага деформации ABCD;  $l_1$  – длина вторичной зоны очага деформации EF.

Пластическая деформация зарождается в т. A и заканчивается в т. F. Профиль очага деформации состоит из передней внеконтактной области ABC, контактной области CDE и задней внеконтактной области EF. Передняя внеконтактная область, в свою очередь, состоит из вогнутого участка AB и выпуклого участка BC.

При нагружении поверхностного слоя пластическая деформация распространяется на глубину h, материальные частицы перемещаются в ОД вдоль линий тока, в результате чего формируется поверхностный слой с неравномерными по глубине степенями деформации сдвига, показателем использования запаса пластичности и тензором остаточных напряжений.

Между геометрическими параметрами очага деформации существуют достаточно тесные взаимосвязи. Кроме того, тесные связи обнаружены между параметрами очага деформации с одной стороны и элементами режима обработки и параметрами качества поверхностного слоя с другой.

Указанные взаимосвязи используются для описания граничных и начальных условий решения задач механики технологического наследования (МТН) [13-14, 17].

В рамках МТН процесс формирования поверхностного слоя детали при обкатывании описан на основе ключевых положений

механики деформируемых сред. Использованы следующие известные тензорные параметры:

• показатель схемы напряженного состояния:

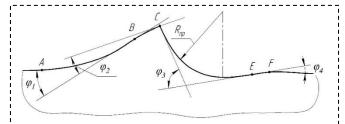
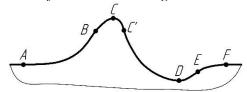


Рис. 3. Схема к определению накопленного угла наклона касательной к профилю очага деформации при ППД

Fig. 3. Scheme for determining the accumulated angle of inclination of the tangent to the profile of the deformation zone during SPD



Puc. 4. Схема профиля ОД Fig. 4. DZ profile diagram

$$\Pi = \frac{\sigma}{T} = \frac{\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\frac{1}{\sqrt{6}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}};$$

• степень деформации сдвига:

$$\Lambda = \langle \frac{2}{\sqrt{3}} \int_0^t \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \left( \xi_x - \xi_y \right)^2 + \left( \xi_y - \xi_z \right)^2 + (\xi_z - \xi_x)^2 \right] + \frac{3}{4}} \cdot (\eta_{xy}^2 + \eta_{yz}^2 + \eta_{zx}^2) \rangle dt;$$

• тензор остаточных напряжений:

$$\left[\mathbf{T}_{\sigma_{\mathrm{OCT}}}\right]_{ij} = \left[\mathbf{T}_{\sigma_{\mathrm{Деф}}}\right]_{ij} + \left[\mathbf{T}_{\sigma_{\mathrm{pa3}}}\right]_{ij} + \left[\mathbf{T}_{\sigma_{t}}\right]_{ij};$$

• степень исчерпания запаса пластичности Калпина-Филиппова:

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 = \Psi_1 + (\Psi_{21} + \Psi_{22}) = n\varphi_0 \int_0^{\Lambda_k} \Lambda_i^{n-1} d\Lambda + \left( \int_0^{\Lambda_k} \frac{d\Lambda}{\Lambda_p} - \varphi_0 \int_0^{\Lambda_k} \Lambda_p^{n-1} d\Lambda \right),$$

где П – показатель схемы напряженного состояния; Л – степень деформации сдвига;  $\left[ \mathbf{T}_{\sigma_{\mathrm{ocr}}} \right]_{ii}$  – тензор остаточных напряжений; Ψ - степень исчерпания запаса пластичности [18];  $\sigma$  – среднее нормальное напряжение; T – интенсивность касательных напряжений;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ,  $\sigma_3$  – главные компоненты тензора напряжений;  $\xi_x$  ,  $\xi_y$  ,  $\xi_z$  ,  $\eta_{xy}^2$  ,  $\eta_{yz}^2$  ,  $\eta_{zx}^2$  – компоненты тензора скоростей деформаций;  $\left[\mathbf{T}_{\sigma_{\mathsf{дe}\Phi}}\right]_{ii}$  – тензор напряжений нагрузки;  $\left[\mathbf{T}_{\sigma_{\mathsf{pas}}}\right]_{ii}$ – тензор напряжений разгрузки;  $\left[\mathbf{T}_{\sigma_t}\right]_{ii}$  – тензор тепловых напряжений;  $\Psi_1$  – составляющая, зависящая от напряжения текучести или от накопленной деформации;  $\Psi_2$  – составляющая, зависящая от пластичности металла в условиях  $\Pi = \text{const}; \Lambda \text{ и } \Lambda_p - \text{накопленная и предельная}$ степень деформации сдвига при данном



Рис. 5. Схема образца для усталостных испытаний

Fig. 5. Schematic diagram of a specimen for fatigue testing



фиксации ОД

Fig. 6. Scheme of rolling samples for fixing the DZ

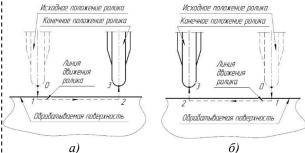


Рис. 7. Схема обкатывания образца на этапе отладочного эксперимента

Fig. 7. Scheme of sample running-in at the stage of debugging experiment

показателе схемы напряженного состояния П; п – коэффициент деформационного упрочнения;  $\varphi_0$  – коэффициент, определяемый на основе испытаний на пластичность.

Расчеты по вышеприведенным зависимостям требуют определенных временных затрат. В то же время было показано, что величина степени деформации сдвига Л при прохождении частицы металла поверхностного слоя вдоль всей траектории движения (вдоль линии тока) пропорциональна суммарному углу наклона касательной к профилю очага деформации на контактной и внеконтактной поверхностях  $\phi_{\Sigma}$ 

Если исходить из этой схемы, расчет степени деформации сдвига может быть проведен по формуле

 $\Lambda = k\varphi_{\Sigma} = k(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4),$ где k – коэффициент, величина которого зависит от кривизны профиля очага деформации и контакте деформирующего на инструмента с деталью.

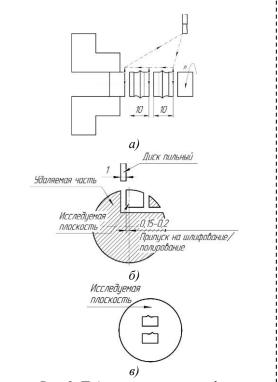


Рис. 8. Подготовка микрошлифа: а – разрезка образца; б – вырезка сегмента; в – схема запрессовки в смолу Fig. 8. Preparation of microsection: a – cutting of sample; b – cutting of segment; c – scheme of pressing into resin

В развитии данной модели в результате выполнения ряда исследований по описанию наследственного профиля ОД аналитическими зависимостями В. Ю. Блюменштейном была модель для расчета деформации сдвига при обработке ППД [17]:

$$\Lambda_{ij} = k \cdot 2 \cdot$$

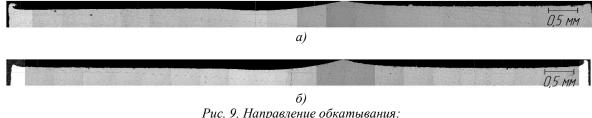
$$\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=3} \operatorname{arct} g \left\{ \left[ -\frac{2\left(\pm\left(x_{B,C',E}\right)_{ij} - c_{ij}\right)}{g_{ij}} \right] \cdot$$

$$\left[ b_{ij} \cdot exp\left(-\frac{\left(\pm\left(x_{B,C',E}\right)_{ij} - c_{ij}\right)^{2}}{g_{ij}}\right) \right] \right\},$$

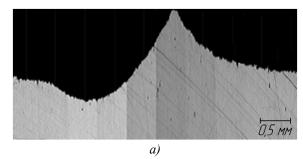
$$(1)$$

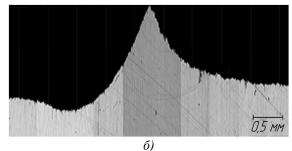
где i — номер стадии нагружения, а j — номер участка профиля ОД;  $c_{ij}$  – коэффициент, зависящий от принятой системы координат;  $b_{ij}$  и  $g_{ii}$  – коэффициенты, зависящие от размеров и кривизны наследственного профиля очага деформации;  $x_{B,C',E}$  — координаты по оси абсцисс точек перегиба B, C', E соответственно (Рис. 4).

обработке Олнако при переходных поверхностей закономерности формирования поверхностного слоя (ПС), присущие обработке цилиндрических поверхностей, работают не в полной мере. В процессе обработки в зоне контакта инструмента с деталью на разных



Puc. 9. Направление обкатывания: a – от патрона; б – к патрону (отзеркалено) Fig. 9. Rolling direction: a – from the chuck; b – to the chuck (mirrored)





Puc. 10. Отпечатки укрупненно (масштаб: в осевом направлении 1:1; в высотном направлении 10:1): а – направление обкатывания от патрона; б – направление обкатывания к патрону (отзеркалено) Fig. 10. Enlarged prints (scale: in the axial direction 1:1; in the height direction 10:1): а – direction of rolling away from the chuck; b – direction of rolling toward the chuck (mirrored)

сложнопрофильной поверхности участках формируется разный по форме очаг деформации (ОД), который свидетельствует нестационарности металла. течения Это, безусловно, сказывается циклических на свойствах материала данного изделия [19-20].

Целью данной работы является исследование способов оценки очага деформации, определение геометрических параметров и накопленной степени деформации сдвига, выявление закономерностей стационарности течения металла в поверхностном слое (ПС) при обкатывании роликом сложнопрофильных поверхностей.

# Экспериментально-аналитическая часть

Таблица 1. Результаты измерения геометрических параметров ОД в Компас-3D

Table 1. Results of measuring the geometric parameters of the DZ in Kompas-3D

Параметр,	Прямая	Обратная
MM	обработка	обработка
$R_{\rm np}$	6,565	5,23
Δ	0,034	0,033
L	3,210	3,166
<i>L</i> 1	0,874	1,381
d	1,449	1,391
<i>d</i> 1	0,567	0,457
d	1,761	1,775
$h_{_{ m I\!\!\!/}}$	0,11	0,136
$h_{\scriptscriptstyle  m I\hspace{1em}I}$	0,046	0,045
$h_{ m p}$	0,156	0,182

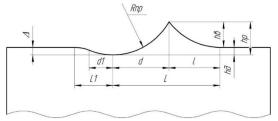


Рис. 11. Схематичное изображение измеряемых параметров

Fig. 11. Schematic representation of the measured parameters

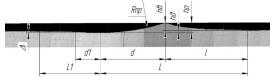


Рис. 12. Пример измерений геометрических параметров ОД

Fig. 12. Example of measurements of geometric parameters of the DZ

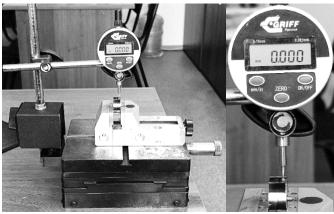
Выполнен комплекс исследований на основе метода конечных элементов, который позволил составить феноменологическую схему формирования стационарного ОД при обработке сложнопрофильных поверхностей [21].

Были проведены экспериментальные исследования трансформации очага деформации при обкатывании сложнопрофильной поверхности; при этом объектами являлись образцы для усталостных испытаний (Рис. 5).

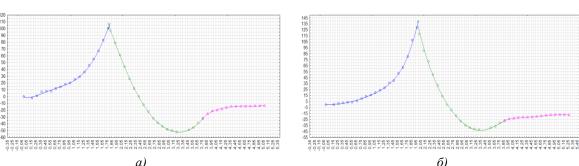
Суть эксперимента заключается в том, чтобы выполнить фиксацию ОД на разных участках поверхности усталостного образца при его обкатывании за один ход с последующим полным анализом данного очага деформации и сравнении с другими, зафиксированными на отличных участках (Рис. 6). эксперимента: включение оборотов шпинделя, подвод ролика исходную позицию, В перемещение ролика до одной из конечных позиций 1...17 с заданной подачей, ускоренный отвод от детали перпендикулярно касательной

профиля поверхности; фиксация отпечатка контакта ролика с деталью.

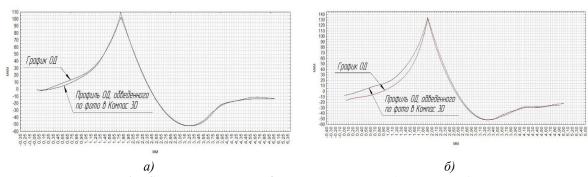
Для реализации данного эксперимента изготовили 17 образцов, на которых фиксировали: два отпечатка на диаметре 25 мм (поз. 1-2); четыре отпечатка на галтели (поз. 3-6); один отпечаток в переходной зоне галтели и диаметра 16 мм (поз. 7); три отпечатка на диаметре 16 мм (поз. 8-10); один отпечаток в переходной зоне диаметра 16 мм и галтели (поз. 11); четыре отпечатка на галтели (поз. 12-15); два отпечатка на диаметре 25 мм (поз. 16-17).



Puc. 13. Пример измерения вертикальных параметров при помощи ИЧЦ Fig. 13. Example of measuring vertical parameters using the IHD



Puc. 14. Восстановленный контур ОД по измерениям при помощи ИЧЦ: а — обработка в прямом направлении; б — обработка в обратном направлении Fig. 14. Reconstructed DZ contour based on measurements using the I: a — processing in the forward direction; b — processing in the reverse direction



Puc. 15. Сравнение контуров ОД, восстановленных двумя способами: а — обработка в прямом направлении; б — обработка в обратном направлении Fig. 15. Comparison of the DZ contours reconstructed in two ways: а — processing in the forward direction; b — processing in the reverse direction

Таблица 2. Результаты измерения геометрических параметров ОД по графикам Table 2. Results of measuring the geometric parameters of the DZ according to the graphs

 Параметр, мм
 Прямая обработка
 Обратная обработка

  $R_{\rm np}$ 
 $\Delta$  0,044
 0,027

 L 3,26
 3,35

1,24 0,95 L11,46 1,35 d 0,51 d10,52 d 1,8 2 0,139 0,104  $h_{\rm II}$  $h_{\underline{A}}$ 0,052 0,042 0,181  $h_{\rm p}$ 0,156

Таблица 3. Вертикальные параметры, измеренные ИЧЦ

Table 3. Vertical parameters measured by the IHD

 tameters measured of the 1115			
Параметр, мм	Прямая обработка	Обратная обработка	
Δ	0,036	0,024	
$h_{_{ m I\! I}}$	0,107	0,142	
$h_{_{ m I\! I}}$	0,048	0,036	
$h_{\mathrm{p}}$	0,155	0,178	

Таблица 4. Измеренные вертикальные и горизонтальные параметры ОД после обкатывания в прямом направлении

Table 4. Measured vertical and horizontal parameters of the DZ after rolling in the forward direction

Параметр,	Компас 3D с учетом	По восстановленным графикам,	Вертикальные
MM	изменения диаметра	измеренных ИЧЦ	параметры ИЧЦ
$R_{\rm np}$	6,565	-	-
Δ	0,034	0,044	0,036
L	3,210	3,26	=
<i>L</i> 1	0,874	1,24	-
d	1,449	1,46	-
d1	0,567	0,51	=
d	1,761	1,8	-
$h_{\scriptscriptstyle  m A}$	0,11	0,104	0,107
$h_{\scriptscriptstyle  m A}$	0,046	0,052	0,048
$h_{ m p}$	0,156	0,156	0,155

Таблица 5. Измеренные вертикальные и горизонтальные параметры ОД после обкатывания в обратном направлении

Table 5. Measured vertical and horizontal parameters of the DZ after rolling in the opposite direction

Параметр,	Компас 3D с учетом	По восстановленным графикам,	Вертикальные
MM	изменения диаметра	измеренных ИЧЦ	параметры ИЧЦ
$R_{\rm np}$	5,23	-	-
Δ	0,033	0,027	0,024
L	3,166	3,35	-
<i>L</i> 1	1,381	0,95	-
d	1,391	1,35	=
d1	0,457	0,52	=
d	1,775	2	=
$h_{ m H}$	0,136	0,139	0,142
$h_{\mathrm{A}}$	0,045	0,042	0,036
$h_{\mathrm{p}}$	0,182	0,181	0,178

При этом нельзя на одном образце сделать несколько отпечатков, т. к. необходимо в формировании ОД учитывать наследование

геометрии других очагов деформации, возникающих на предыдущих участках сложнопрофильной поверхности.

Для отладки методики проведения основного эксперимента был выполнен промежуточный эксперимент по исследованию геометрических параметров ОД и определению коэффициентов для расчета накопленной степени деформации сдвига  $\Lambda$ .

Эксперимент заключался в следующем. Выполнялась имитация фиксации очагов в позициях 1-2 (Рис. 6). Для этого на произвольном диаметром 25 мм выполнялось образце обкатывание с фактическим усилием 3870 Н на длину 20 мм (Рис. 7, а). Данное усилие примерно равно натягу 0,05 мм, что будет показано ниже. Этапы эксперимента: ролик занимал исходное положение 0; включалось вращение заготовки 700 об/мин; включалась подача смазывающеохлаждающей жидкости (СОЖ); выполнялось перемещение в позицию 1 с подачей 0,5 мм/об до достижения заданного усилия; выполнялось перемещение в позицию 2 с подачей 0,05 мм/об; с позиции 2 в позицию 3 выполнялся быстрый отвод с подачей 4000 мм/мин для фиксации ОД. Обкатывание выполнялось в направлении от патрона. Также было выполнено обкатывание в обратном направлении (в направлении

Таблица 6. Результаты расчета накопленной степени деформации на каждом участке очага деформации и общая

Table 6. Results of calculating the accumulated degree of deformation in each section of the deformation zone and the total

erormation zone and the total			
	Обкатывание с	Обкатывание с	
	усилием 3870 Н	усилием 3870 Н	
	в прямом	в обратном	
	направлении	направлении	
$\Lambda_1$	0,439	0,603	
$\Lambda_2$	0,574	0,639	
$\Lambda_3$	0,111	0,084	
Λ	1,124	1,326	

патрону) (Рис. 7, б) для оценки симметричности обкатывающего ролика.

После обкатывания из образца вырезались сегменты для подготовки микрошлифов (Рис. 8). Измерение геометрических параметров отпечатков выполнялось двумя способами:

- 1) фотографирование поверхности микрошлифа через микроскоп; загрузка полученного изображения поверхностного слоя в САD-систему; обводка профиля и выполнение измерений высотных и осевых параметров отпечатков;
- 2) измерение высотных параметров отпечатков при помощи индикатора часового цифрового (ИЧЦ); построение графиков по полученным значениям; вычисление высотных и осевых параметров по полученным графикам.

Способ 1. При помощи объектива микротвердомера DuraScan 20 были сняты снимки экрана, при слепке которых получились профили ОД (Рис. 9-10).

Далее полученные снимки загружались в программный продукт Компас-3D, и в масштабе выполнялось измерение параметров, представленных на Рис. 11. Пример измерений представлен на Рис. 12. Результаты измерений представлены в Таблице 1.

2. этапом Способ Следующим выполнено измерение вертикальных параметров очага деформации с использованием индикатора часового цифрового (ИЧЦ) (Рис. 13). Сегмент образца устанавливался в тиски на координатном При помощи вращения ручки выполнялось продольное перемещение с шагом 0,1 мм и фиксацией значения на ИЧЦ. По полученным данным выполнялось построение графиков (Рис. 14), по которым определялись геометрические параметры ОД (Рис. 11). Измеренные параметры представлены в Таблице 2. Также отдельно выполнялось измерение только высотных параметров (Таблица 3).

Далее было выполнено сравнение графиков ОД, полученных путем измерения ИЧЦ, с контурами ОД, полученными путем обводки снимков в Компас-3D (Рис. 15).

Из Рис. 15 следует, что полученные контуры ОД имеют высокую сходимость, что говорит о корректности использования способ представленных способов. Однако восстановления профиля ОД путем построения графиков достаточно трудоемкий, в отличие от через Компас 3D. предлагается использование комбинированного способа: измерение вертикальных (высотных) параметров с помощью ИЧЦ, а осевых (линейных) параметров – с помощью Компас-3D.

Для наглядности все полученные результаты сведены в Таблицах 4-5.

Имея полученные значения геометрических параметров очага деформации, выполняли расчет степени деформации сдвига  $\Lambda$  по формуле:

$$\Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3,\tag{2}$$

где согласно модели (1) выражения для расчета степени деформации сдвига на каждом участке профиля ОД имели вид:

• для участка профиля передней внеконтактной поверхности (ABC):

$$\Lambda_{1} = k \cdot 2 \cdot arctg \left\{ \left[ -\frac{2(x_{B} - c_{1})}{g_{1}} \right] \cdot \left[ b_{1} \cdot \exp\left( -\frac{(x_{B} - c_{1})^{2}}{g_{1}} \right) \right] \right\};$$

$$(3)$$

• для участка профиля передней контактной поверхности (*CC'D*):

$$\Lambda_2 = k \cdot 2 \cdot arctg \left\{ \left[ -\frac{2(-x_{C'} - c_2)}{g_2} \right] \cdot \right. \tag{4}$$

$$\left[b_2 \cdot exp\left(-\frac{(-x_{c'}-c_2)^2}{g_2}\right)\right]$$
;

• для участка профиля задней контактной поверхности (DEF):

$$\Lambda_{3} = k \cdot 2 \cdot arctg \left\{ \left[ -\frac{2(x_{E} - c_{3})}{g_{3}} \right] \cdot \left[ b_{3} \cdot exp \left( -\frac{(x_{E} - c_{3})^{2}}{g_{3}} \right) \right] \right\}.$$
 (5)

Определение значений  $x_{B,C',E}$  производилось путем дифференцирования функций описания каждого профиля ОД. Общий вид функции для описания выбранного участка профиля ОД j был представлен формулой:

$$y_j = b_{0j} + b_j * exp\left(-\frac{(\pm x - c_j)^2}{g_j}\right),$$

где  $b_{0j}$  – коэффициент, зависящий от принятой системы координат.

Выражения для каждого участка профиля ОД выглядят следующим образом:

для профиля передней внеконтактной поверхности *ABC*:

$$y_1 = b_{01} + b_1 * exp\left(-\frac{(x-c_1)^2}{g_1}\right);$$

для профиля передней контактной поверхности  $\mathcal{CC}'D$ :

$$y_2 = b_{02} + b_2 * exp\left(-\frac{(-x-c_2)^2}{g_2}\right);$$

для профиля задней контактной поверхности DEF:

$$y_3 = b_{03} + b_3 * exp\left(-\frac{(x-c_3)^2}{g_3}\right).$$

Исходя из того, что в нашем случае для описания каждого участка профиля ОД система координат была выбрана таким образом, чтобы ось абсцисс и ось ординат проходили через точку экстремума (минимума) профиля ОД, т. е. точку D (Рис. 4), и учета размеров и кривизны наследственного профиля очага деформации, были приняты следующие коэффициенты:  $c_1 = -d; \ c_2 = d; \ c_3 = L_1; \ b_{01} = h_{\rm g}; \ b_{02} = b_{03} = 0;$   $b_1 = h_{\rm B}; \ b_2 = h_{\rm p}; \ b_3 = \Delta; \ g_1 = \frac{1}{\sqrt{h_{\rm B}^2 + l^2}}; \ g_2 = \frac{1}{\sqrt{h_{\rm B}^2 + l^2}}; \ g_2 = \frac{1}{\sqrt{h_{\rm B}^2 + l^2}}; \ g_3 = \frac{1}{\sqrt{h_{\rm B}^2 + l^2}}; \ g_4 = \frac{1}{\sqrt{h_{\rm B}^2 + l^2}}; \ g_5 = \frac{1}{\sqrt{h_{\rm B}^2 + l^2}}; \ g_6 = \frac{1}{\sqrt{h_{\rm B}^2 + l^2}}; \ g_8 = \frac{1}{\sqrt{h_{\rm B}^2 + l^2}}; \ g_9 = \frac{1}{\sqrt{h_{\rm B}^2 + l^2}}; \ g_9 = \frac{1}{\sqrt{h_{\rm B}^2 + l^2}}; \ g_{11} = \frac{1}{\sqrt{h_{\rm B}^2 + l^2}}; \ g_{12} = \frac{1}{\sqrt{h_{\rm B}^2 + l^2}}; \ g_{13} = \frac{1}{\sqrt{h_{\rm B}^2 + l^2}}; \ g_{14} = \frac{1}{\sqrt{h_{\rm B}^2 + l^2}}; \ g_{15} = \frac{1}{\sqrt{h_{15}^2 + l^2}}; \ g_{15} =$ 

$$\frac{1}{\sqrt{h_{\rm p}^2 + d^2}}$$
;  $g_3 = \frac{1}{\sqrt{L_1^2 + \Delta^2}}$ ;  $k = 1.8$ .

Результаты подстановки всех известных значений в формулы (2-5) представлены в Таблице 6.

## Выводы.

1. Выявлено, что профильный радиус ролика имеет асимметричность: при прямой обработке профильный радиус составил примерно 6,7 мм, при обратной — примерно 5,1 мм. Для последующих экспериментов при условии прямой обработки требуется развернуть ролик в оснастке на 180 градусов. Это необходимо для

приближения результатов экспериментов к результатам исследований геометрии ОД после моделирования и к результатам работ других авторов.

- 2. Установлено, что вертикальные параметры точнее определить при помощи индикатора, а горизонтальные параметры точнее определяются по снимкам (т. е. с обводкой в Компас 3D) и графикам. При этом профильный радиус легче вычислить по снимку в Компас 3D.
- 3. Показано, что восстановленные профили очагов деформации по двум способам имеют высокую сходимость. Однако способ измерения горизонтальных параметров через построение графиков достаточно трудоемкий, в отличие от измерения геометрии по снимкам.
- 4. Исходя из выводов 2 и 3, в последующих экспериментах было решено использовать комбинированный способ измерения геометрических параметров отпечатков: измерение вертикальных (высотных) параметров выполнять с использованием ИЧЦ, а измерение горизонтальных (осевых) выполнять по снимкам.
- 5. Определено, что обкатывание образца диаметром 25 мм роликом, с профильным радиусом  $\approx 6.5$  мм, с усилием 3870 H дает натяг  $\approx 0.048$  мм. Обкатывание образца диаметром 25 мм роликом, с профильным радиусом  $\approx 5.2$  мм, с усилием 3870 H дает натяг  $\approx 0.04$  мм.
- 6. Установлено, что для описания каждого участка профиля ОД функциями важно правильно определить значение всех коэффициентов.
- 7. Определено, что при обкатывании образца диаметром 25 мм роликом, с профильным радиусом  $\approx$  6.5 мм, с усилием 3870 Н накопленная степень деформации сдвига  $\Lambda=1.124$ . При обкатывании образца диаметром 25 мм роликом, с профильным радиусом  $\approx$  5.2 мм, с усилием 3870 Н накопленная степень деформации сдвига  $\Lambda=1.326$ .

Полученные результаты сопоставимы результатами других авторов, свидетельствует о корректной методике оценки геометрии ОД. Полученные результаты будут положены в основу методики назначения режимов и выбору оснастки для обработки обкатыванием криволинейных поверхностей, обеспечивающих стационарное пластическое течение металла и, соответственно, требуемую циклическую долговечность упрочненных деталей.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Шматов А. А. Методы термоциклической обработки для объемного упрочнения стальных инструментов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. N 7. С. 56–60.
  - 2. Мольцен С. Н., Шестакова И. В.,

- Кравченко А. В., Симонов Ю. Н. Локальное упрочнение циклически нагруженных деталей индукционной термической обработкой // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2023. Т. 25. № 4. С. 81–91.
- 3. Мельник Ю. А., Метель А. С., Мустафаев Э. С., Нэй Х. А. Метод упрочнения инструмента покрытием из нитрида титана, синтезируемым при испарении титана в тиглеаноде тлеющего разряда // Вестник МГТУ «Станкин». 2018. № 4(47). С. 94–98.
- 4. Белоцерковский М. А., Прядко А. С., Черепко А. Е. Технологические особенности и области использования гиперзвуковой металлизации // Инновации в машиностроении: междунар. науч. конф., Минск, 30–31 окт. 2008 / редкол.: М. С. Высоцкий [и др.]. Минск : ОИМ НАН Беларуси, 2008. С. 479–484.
- 5. Кане М. М., Крайко С. Э., Раманович А. А. Формирование некоторых показателей качества рабочих поверхностей вырубных штампов при их лазерном упрочнении // Актуальные вопросы машиноведения. 2022. Т. 11. С. 17–21.
- 6. Блюменштейн В. Ю., Махалов М. С. механического Трансформация состояния поверхностного слоя металла в процессах механической обработки // Инновации машиностроении Сборник : трудов Международной научно-практической конференция, Кемерово, 26-29 ноября 2019 года / Под редакцией В. Ю. Блюменштейна. Кемерово: технический Кузбасский государственный университет имени Т. Ф. Горбачева, 2019. С. 489-495.
- 7. Жигалов А. Н., Богдан Д. Д., Горавский И. А. Исследования влияния аэродинамического звукового упрочнения на свойства твердых сплавов // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. 2020. № 8. С. 53–68.
- 8. Орлов А. С., Полетаев В. А. Упрочнение режущих инструментов импульсной магнитной обработкой // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2019. № 15. С. 5–13.
- 9. Рогожкин С. В., Никитин А. А., Искандаров Н. А. [и др.] Исследование низкотемпературного радиационного упрочнения ферритно-мартенситных сталей // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2020. № 2(103). С. 41–51.
- 10. Колмыков Д. В., Воробьева О. В., Катенев В. В. Комбинированные методы восстановления и упрочнения стальных деталей // Auditorium. 2016. № 4(12). С. 48–53.
- 11. Суслов А. Г. [и др.] Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим

- деформированием [Текст] : в 2 т. Под общ. ред. А. Г. Суслова. Москва : Машиностроение, 2014. Т. 1. 477 с.
- 12. Суслов А. Г. [и др.] Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием [Текст] : в 2 т. Под общ. ред. А. Г. Суслова. Москва : Машиностроение, 2014. Т. 2. 444 с.
- 13. Блюменштейн В. Ю., Смелянский В. М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение, 2007. 400 С.
- 14. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М. : Машиностроение, 2002. 300 с.
- 15. Чайкин А. С. Аналитическое определение геометрии очага деформации в технологических процессах поверхностно-пластического деформирования (ППД) // Ежегодник НИИ фундаментальных и прикладных исследований. 2012. № 3(3). С. 24–29. EDN SDIFIR.
- 16. Чайкин А. С. Расчетно-экспериментальное определение геометрии и площади очага деформации в технологических процессах ППД // Ежегодник НИИ фундаментальных и прикладных исследований. 2015. № 1-2(7). С. 86–90. EDN VLPTXZ.
- 17. Блюменштейн В. Ю. Механика технологического наследования как научная основа проектирования процессов упрочнения деталей машин поверхностным пластическим деформированием: дис. ... д-р техн. наук: 05.02.08. М., 2002.
- 18. Филиппов Ю. К. Критерий оценки качества деталей, получаемых холодной объемной штамповкой // Кузнечно-штамповочное производство. 1999. № 2. С. 3–9.
- 19. Вакулюк В. С. Разработка метода и средств прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных деталей с концентраторами по распределению остаточных напряжений: дис... канд. техн. наук: 01.02.06. Самара, 2014. 310 с.
- 20. Сидякин Ю. И., Бочаров Д. А. Повышение циклической прочности галтелей ступенчатых валов обкаткой роликами или шариками // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2009. № 8(56). С. 37–40.
- 21. Учайкин С. Е. Влияние технологических факторов на формирование очага деформации при обкатывании сложнопрофильных поверхностей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 5(165). С. 19–29. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-19-29. EDN DZJODT.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Об авторах:

**Учайкин Сергей Евгеньевич,** аспирант кафедры технологии машиностроения, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Российская Федерация), e-mail: uchaikinse@kuzstu.ru

**Блюменштейн Валерий Юрьевич**, профессор кафедры технологии машиностроения, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Российская Федерация), докт. техн. наук, профессор, e-mail: blumenstein.vu@gmail.com

### Заявленный вклад авторов:

Учайкин Сергей Евгеньевич — постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Блюменштейн Валерий Юрьевич — постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

# Original article

# DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ASSESSING A DEFORMATION SITE FORMED DURING ROLLER ROLLS ON COMPLEX-PROFILE SURFACES

Sergei E. Uchaikin\* Valery Yu. Blumenstein

- T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University
- \* for correspondence: uchaikinse@kuzstu.ru



Article info Received: 04 April 2025

Accepted for publication: 10 June 2025

Accepted: 20 June 2025

Published: 26 June 2025

Keywords: complex profile shafts, surface plastic deformation, rolling, deformation zone, degree of shear deformation.

#### Abstract

A technique has been developed for estimating the deformation zone (DZ), determining the geometric parameters and calculating the accumulated degree of shear deformation in different areas of a complex-profile surface during roller rolling. Structural elements such as keyways and splines, fillet transitions between steps, grooves, threads, etc., are stress concentrators that negatively affect the performance properties of parts. In most cases, shafts are subject to cyclic alternating loads, so ensuring the required cyclic durability or increasing it is an urgent task. The analysis showed that one of the available methods that does not require expensive equipment and tooling is the method of surface plastic deformation (SPD) by roller rolling. In the opinion of the authors, identifying the regularities of the stationarity of metal flow in the surface layer (SL) during roller rolling of complex-profile surfaces will help solve this problem. In preparation for the main experiments on studying the deformation center transformation in different areas of a complex-profile surface during rolling with rollers, a debugging experiment was performed, which considered methods for estimating the geometric parameters of the deformation zone (axial and altitude) and calculating the accumulated degree of shear deformation. To calculate the latter, it was proposed to use a known model in which the geometric parameters of the deformation center are unknown. To determine the horizontal and vertical parameters of the deformation center, 2 methods were proposed that showed similar results. The results of calculating the accumulated degree of shear deformation are comparable with the results of other authors, which indicates the possibility of using the developed technique.

*For citation:* Uchaikin S.E., Blumenstein V.Yu. Development of a method for assessing a deformation site formed during roller rolls on complex-profile surfaces. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 3(169):59-71. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-59-71, EDN: PPFUXS

#### REFERENCES

- 1. Shmatov A.A. Methods of thermal cycling treatment for volumetric hardening of steel tools. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2021; 7:56–60.
- 2. Moltsen S.N., Shestakova I.V., Kravchenko A.V., Simonov Yu.N. Local hardening of cyclically loaded parts by induction heat treatment. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University*. 2023; 25(4):81–91.
- 3. Melnik Yu.A., Metel A.S., Mustafayev E.S., Ney H.A. Method of tool strengthening with titanium nitride coating synthesized by titanium evaporation in a glow discharge crucible anode. *Bulletin of MSTU*. 2018; 4(47):94–98.
- 4. Belotserkovsky M.A. Technological features and areas of application of hypersonic metallization. *Innovations in mechanical engineering*. 2008. Pp. 479–484
- 5. Kane, M. M. Formation of some quality indicators of working surfaces of cutting dies during their laser hardening. *Actual issues of mechanical engineering*. 2022; 11:17–21.
- 6. Blumenstein V.Yu. Transformation of the mechanical state of the surface layer of metal in mechanical processing processes. *Innovations in mechanical engineering*. 2019. Pp. 489–495.
- 7. Zhigalov A.N. Research of the influence of aerodynamic sound hardening on the properties of hard alloys. *Bulletin of Baranovichi State University*. 2020; 8:53–68.
- 8. Orlov, A. S. Hardening of cutting tools by pulsed magnetic treatment. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2019; 15:5–13.
- 9. Rogozhkin S.V., Nikitin A.A., Iskandarov N.A. Study of low-temperature radiation hardening of ferritic-martensitic steels. *Issues of atomic science and technology*. 2020; 2(103):41–51.
- 10. Kolmykov D.V. Combined methods of restoration and hardening of steel parts. *Auditorium*. 2016: 4(12):48–53.
- 11. Suslov A.G. Technology and tools for finishing and hardening treatment of parts by surface plastic deformation. Vol. 1. Moscow: Mashinostroenie; 2014.

- 12. Suslov A.G. Technology and tools for finishing and hardening treatment of parts by surface plastic deformation. Vol. 2. Moscow: Mashinostroenie; 2014.
- 13. Blumenshtein V.Yu., Smelyansky V.M. Mechanics of technological inheritance at the stages of processing and operation of machine parts. M.: Mechanical Engineering; 2007.
- 14. Smelyansky V.M. Mechanics of hardening of parts by surface plastic deformation. Moscow: Mashinostroenie; 2002.
- 15. Chaikin A.S. Analytical determination of the geometry of the deformation zone in technological processes of surface plastic deformation (SPD). *Yearbook of the Research Institute of Fundamental and Applied Research*. 2012; 3(3):24–29.
- 16. Chaikin A.S. Calculation and experimental determination of the geometry and area of the deformation zone in technological processes of SPD. *Yearbook of the Research Institute of Fundamental and Applied Research*. 2015; 1–2(7):86–90.
- 17. Blumenstein V.Yu. Mechanics of technological inheritance as a scientific basis for designing hardening processes for machine parts by surface plastic deformation: diss. ... Doctor of Engineering Sciences: 05.02.08. Moscow; 2002.
- 18. Filippov Yu.K. Quality Assessment Criterion for Parts Obtained by Cold Volumetric Stamping. *Forging and Stamping Production*. 1999; 2:3–9.
- 19. Vakulyuk V.S. Development of the method and means for predicting the fatigue limit of surface-hardened parts with concentrators based on the distribution of residual stresses: diss... Cand. of Engineering Sciences: 01.02.06. Samara; 2014.
- 20. Sidyakin Yu.I. Increasing the cyclic strength of stepped shaft fillets by rolling with rollers or balls. *Bulletin of the Volgograd State Technical University*. 2009; 8(56):37–40.
- 21. Uchaikin S.E. Influence of technological factors on the formation of a deformation zone during rolling of complex-profile surfaces. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2024; 5(165):19–29.
- © 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

**Sergei E. Uchaikin**, postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering Technology, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russian Federation, Kemerovo, Vesennaya St., 28), e-mail: uchaikinse@kuzstu.ru

Valery Yu. Blumenstein, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russian Federation, Kemerovo, Vesennaya St., 28), Dr. Sc. in Engineering, e-mail: blumenstein.vu@gmail.com

#### Contribution of the authors:

Sergei E. Uchaikin – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text. Valery Yu. Blumenstein - research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.

