



Научная статья

УДК 621.787.4

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-580-592>

## Интенсификация напряженного состояния в очаге деформации при локальном воздействии деформирующего инструмента

Семен Азикович Зайдес<sup>1✉</sup>, Хай Нгуен Хью<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia<sup>1</sup>zsahaus@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9416-7749<sup>2</sup>nquan6799@gmail.com, orcid.org/0000-0001-7909-385X

**Резюме.** Целью данной работы является разработка новой схемы отделочно-упрочняющей обработки за счет изменения кинематики деформирующего инструмента с двухрадиусной формой профиля рабочей поверхности и определение напряженно-деформированного состояния в очаге упругопластической деформации и остаточных напряжений в упроченной зоне поверхностного слоя. Для достижения поставленной цели использовано программное обеспечение для 3D-проектирования SOLIDWORKS 2018 и метод конечных элементов на основе компьютерной программы ANSYS Workbench 19.1 для построения математической модели локального нагружения. Определены временные и остаточные напряжения, деформированное состояние в зоне нагружения, глубина пластического слоя и максимальная величина относительной пластической деформации при разных схемах нагружения рабочим инструментом. В работе установлено, что при реверсивном вращении двухрадиусного ролика значения временных напряжений более чем на 15% выше по сравнению со значением временных напряжений при статическом упрочнении, а остаточные напряжения – больше на 5,7%. При реверсивном вращении двухрадиусного ролика значение максимальной интенсивности деформации выше в 2,11 раза по сравнению со значением максимальной интенсивности деформации при статическом упрочнении. Интенсивность максимальных остаточных напряжений при реверсивном вращении двухрадиусного ролика возникает не на поверхности образца, а в некоторой глубине, которая в 3 раза превышает величину внедрения двухрадиусного ролика. Полученные результаты компьютерного моделирования и численные расчеты свидетельствуют о том, что наибольшее влияние на интенсивность напряженного состояния в очаге деформации оказывает схема реверсивного вращения двухрадиусного тороидального ролика, а наименьшее – схема статического упрочнения однорадиусным роликом. Результаты исследования дают основание полагать, что предложенный технологический процесс поверхностного пластического деформирования на основе реверсивного вращения рабочего инструмента даст возможность снизить величину радиального натяга при сохранении высокого качества поверхностного слоя деталей машин.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, кинематика инструмента, остаточное напряжение, конечно-элементное моделирование, двухрадиусный ролик, процесс нагружения

**Для цитирования:** Зайдес С. А., Нгуен Хью 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>.

### MECHANICAL ENGINEERING

Original article

## Intensification of stress state at deformation site under local action of a deformation tool

Semen A. Zaides<sup>1✉</sup>, Hai Nguyen Huu<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia<sup>1</sup>zsahaus@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9416-7749<sup>2</sup>nquan6799@gmail.com, orcid.org/0000-0001-7909-385X

© Зайдес С. А., Нгуен Хью Хай, 2022

**Abstract.** This paper discusses the development of a new procedure for finishing and hardening treatment by changing the kinematics of a deformation tool having a double-radius shape of the profile of the working surface, along with the determination of the stress-strain state in the site of elastic-plastic deformation and residual stresses in the hardened zone of the surface layer. The SOLIDWORKS 2018 software for 3D design and the ANSYS Work-bench 19.1 software using the finite element method were used to build a mathematical model of local loading. The temporary and residual stresses, the strain state in the loading zone, the depth of the plastic layer and the maximum value of the relative plastic deformation under various loading procedures of the working tool were determined. It was established that, at the reversible rotation of a double-radius roller, the values of temporary stresses are over 15% higher compared to those during static hardening, while the residual stresses are 5.7% higher. With the reversible rotation of the double-radius roller, the value of the maximum strain intensity becomes 2.11 times higher than that during static hardening. The intensity of the maximum residual stresses during the reverse rotation of the double-radius roller occurs at a depth 3 times greater than the indentation of the double-radius roller, rather than on the surface of the sample. The results of computer modeling and numerical calculations indicate that the procedure of reversible rotation of a toroidal double-radius roller has the greatest influence on the intensity of the stress state in the deformation site, while the procedure of static hardening by a single-radius roller has the least impact. The obtained results suggest that the proposed technological process of surface plastic deformation based on the reversible rotation of the working tool will allow the radial tension to be reduced while maintaining the high quality of the surface layer of machine parts.

**Keywords:** stress-strain state, tool kinematics, residual stress, finite element modeling, double radius roller, loading

**For citation:** 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>.

## ВВЕДЕНИЕ

Детали машин, к которым предъявляют повышенные эксплуатационные требования, обычно подвергаются отделочно-упрочняющей обработке. В металлообрабатывающей промышленности все шире применяется безрежущий способ механической обработки, основанный на принципе пластической деформации поверхности металла в холодном состоянии – способ поверхностного пластического деформирования (ППД), имеющий целый ряд преимуществ перед способом обработки резанием. С помощью режущей обработки нельзя достичь таких показателей качества, как повышение твердости и износостойкости поверхностного слоя, повышенного предела текучести и особенно предела усталостной прочности материала и ряд других эксплуатационных свойств деталей машин<sup>3</sup> [1–4]. Эти и другие эксплуатационные свойства деталей можно получить, используя отделочно-упрочняющую обработку поверхностным пластическим деформированием, обеспечивающим в итоге высокую экономическую эффективность за счет повышения долговечности машиностроительных конструкций.

Детали типа валов и осей малой жесткости являются наиболее часто используемыми

детальными в машиностроении. Такие детали работают в условиях высоких скоростей относительного перемещения и больших давлений, вызывающих усталостные разрушения деталей, контактные повреждения и схватывание металла. Малая изгибная жесткость стержневых деталей типа валов и осей сказывается отрицательно не только при эксплуатации техники, но и при механической обработке. Центробежные силы, возникающие при вращении заготовки, и радиальные силы в зоне контакта деформирующего инструмента вызывают ее искривление, которое не позволяет не только сохранить ее геометрию, но и получить стабильные механические свойства по длине детали. Повысить качество обработки можно за счет снижения частоты вращения заготовки или уменьшения величины натяга рабочего инструмента, но эти действия отрицательным образом сказываются на производительности механического процесса обработки.

Для решения указанных технологических проблем предлагается подход, основанный на усилении напряженного состояния в зоне контакта рабочего инструмента с поверхностью детали. Временные напряжения, формирующиеся в очаге деформации, оказывают непосредственное влияние не только на фи-

<sup>3</sup>Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. М.: Изд-во «Машиностроение», 1987. 328 с.

зико-механические характеристики поверхностного слоя, но и на остаточные напряжения, а в конечном итоге и на эксплуатационные свойства деталей машин [5].

В связи с изложенным, целью данной работы является разработка новой схемы отделочно-упрочняющей обработки за счет изменения кинематики деформирующего инструмента с тороидальной формой профиля рабочей поверхности, определение напряженно-деформированного состояния в очаге упругопластической деформации и остаточных напряжений в упрочненной зоне поверхностного слоя.

### **АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗВЕСТНЫХ СХЕМ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

Наиболее эффективное деформационное упрочнение деталей может быть реализовано путем целенаправленных технологических воздействий на структуру металла для увеличения плотности дислокаций и создания дислокационной субструктуры, увеличивающей сопротивление сдвигу [6, 7].

Теория, подтвержденная практикой, показывает, что прочностные свойства металлов можно значительно повысить, если использовать основные принципы дислокационной теории упрочнения. Один из подходов решения этой задачи связан с деформационным искажением микроструктуры материала. В этой связи необходимо разработать такой технологический процесс отделочно-упрочняющей обработки, который бы усиливал деформационное искажение поверхностного слоя.

В практике поверхностного пластического деформирования известны и широко используются две схемы упрочняющей обработки: упрочнение по схеме качения рабочего инструмента и упрочнение по схеме скольжения [1]. К недостаткам, которые касаются поставленной задачи, традиционного способа обработки можно отнести повышение напряженного состояния в контактной зоне за счет уменьшения диаметра рабочего инструмента или за счет повышения величины натяга. Однако при обработке нежестких деталей эти приемы не решают проблемы.

В Иркутском национальном исследовательском техническом университете вопросы интенсификации напряженного состояния в очаге деформации решаются за счет применения более сложной кинематики рабочего инструмента [8]. В работе [9] предложено вращать тороидальный ролик не относительно традиционной оси вращения, а оси, перпендикулярной к ней, которая проходит через соединяющую два деформирующих ролика плоскость.

Предложенная кинематика движения деформирующего инструмента усиливает искажение зеренной структуры материала, способствует усилению дислокационных процессов и несколько повышает степень наклепа поверхностного слоя.

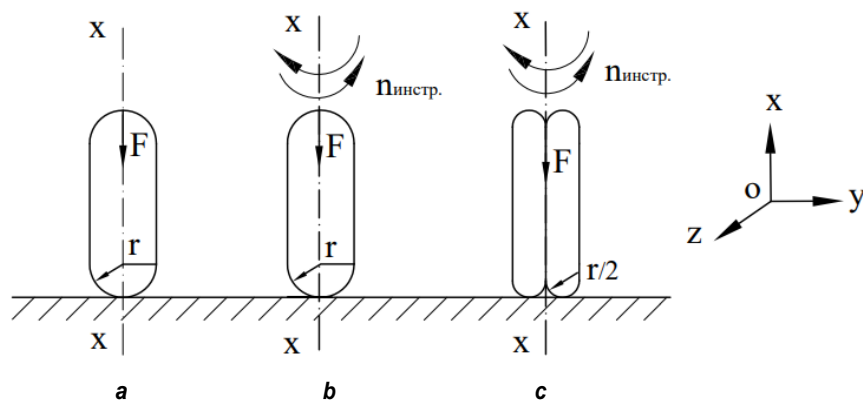
Однако недостатком указанной схемы обработки является снижение качества поверхности заготовки из-за проскальзывания ролика в тот момент, когда ось его вращения совпадает с направлением оси детали. Вращение рабочего инструмента в одном направлении производит слабое искажение зеренной структуры материала, что снижает степень и глубину упрочненного слоя.

В работе поставлена задача по повышению напряженного состояния в очаге деформации при локальном воздействии деформирующего инструмента, позволяющего получить повышенную степень упрочнения в поверхностных слоях деталей машин.

### **КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ТОРОИДАЛЬНЫХ РОЛИКОВ**

Рассмотрим несколько схем локального контакта рабочего инструмента с плоской поверхностью детали.

Рабочий ролик на рис. 1 а под действием силы  $P$  воздействует на поверхность детали статически. Ролики на схемах *b* и *c* (см. рис. 1) совершают реверсивное движение относительно вертикальной оси с амплитудой угла  $\alpha$  ( $-180^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ ) и реверсивной частотой вращения  $n_{\text{инстр}}$ . Разница между последними двумя схемами заключается в том, что в схеме *b* деформирующий элемент представляет собой тороидальный ролик с профильным радиусом  $r$ , а в схеме *c* – двухрадиусный ролик с профильным радиусом  $r/2$ .



**Рис. 1. Кинематические схемы воздействия тороидального ролика с обрабатываемой поверхностью:**  
**a – статическое упрочнение; b – ролик с реверсивным вращением относительно  $x-x$  с амплитудой угла  $\alpha$ ;**  
**c – двухрадиусный ролик с реверсивным вращением относительно  $x-x$  с амплитудой угла  $\alpha$**   
**Fig. 1. Kinematic diagrams of the toroidal roller impacting the machined surface: a – static hardening;**  
**b – roller with reverse rotation relative to  $x-x$  with  $\alpha$  angle amplitude;**  
**c – two-radius roller with reverse rotation relative to  $x-x$  with  $\alpha$  angle amplitude**

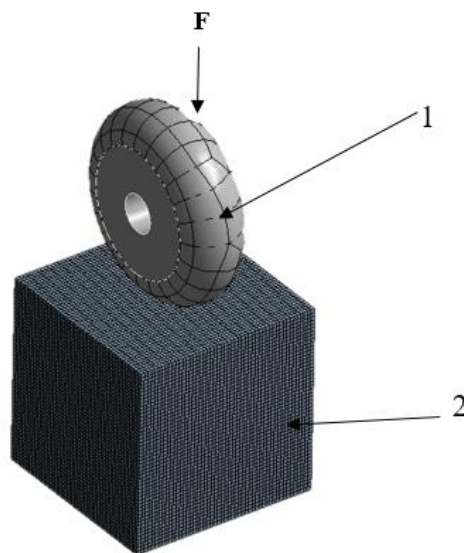
Новая кинематика рабочего инструмента со специальной формой деформирующего элемента, выполненного в виде двух деформирующих роликов, на наш взгляд, должна более эффективно искажать структуру материала, а, следовательно, повышать напряженное состояние в поверхностном слое упрочненной детали [10].

### ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ НАГРУЖЕНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для определения напряжений и деформаций в зоне рабочего контакта, остаточных напряжений при обработке ППД широко используют метод конечных элементов, который является эффективным инструментом для решения задач во многих областях механики. В настоящее время существует большое количество компьютерных программ для конечно-элементного анализа, средних них широко и эффективно используется программное обеспечение ANSYS<sup>4</sup> [11], которое и было использовано в данной работе.

Так как деформирующий инструмент, являющийся тороидальным роликом, совершает сложные кинематические движения, было применено динамическое моделирование,

которое представляет собой метод получения данных о процессах, происходящих в моделируемой системе. При этом системы координат, время и его деление, способ построения сетевых моделей и их параметры являются основными факторами для получения более надежных характеристик моделируемой системы [12].



**Рис. 2. Конечно-элементная модель при нагружении образца тороидальным роликом (1 – жесткий ролик; 2 – образец)**  
**Fig. 2. Finite element model under sample loading by a toroidal roller (1 – hard roller; 2 – sample)**

<sup>4</sup>Баков К. А. ANSYS: справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.

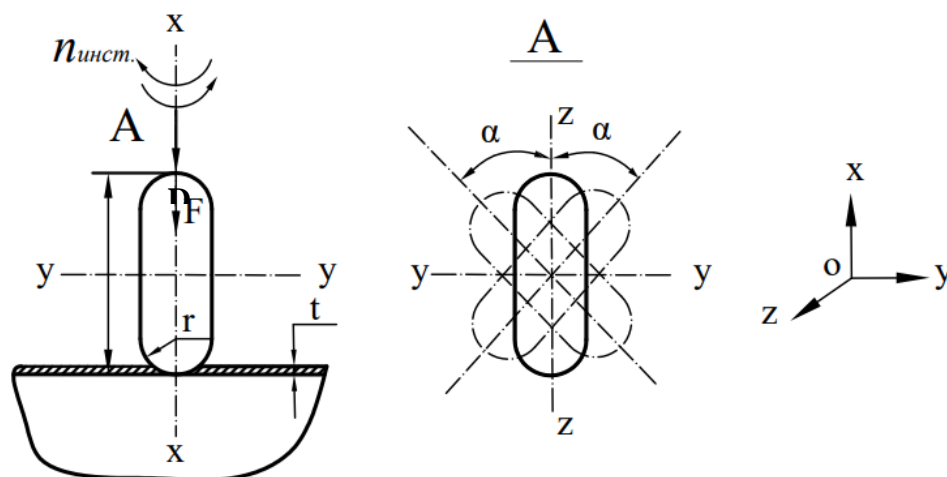


Рис. 3. Схема реверсивного вращения рабочего инструмента  
Fig. 3. Diagram of working tool reverse rotation

Для проведения расчетов по определению напряжено-деформированного состояния процессов нагружения приняты следующие параметры и режимы обработки: тип индентора – ролик, абсолютно жесткое тело диаметром  $D = 30$  мм с приведенным радиусом  $r = 5$  мм; величина натяга  $t = 0,1$  мм; частота реверсивного вращения рабочего инструмента  $n = 300$  дв. ход/мин<sup>-1</sup>; коэффициент трения  $f = 0,1$ ; амплитуда угла реверса  $\alpha = 15^\circ$ .

Характеристики заготовки: в качестве заготовки был использован кубический образец с размерами ребра 30 мм; материал – сталь

45 – упругопластический, упрочняющийся; модуль упругости  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ ; предел текучести  $\sigma_T = 360$  МПа, модуль упрочнения  $E_T = 1,45 \cdot 10^3$  МПа.

Для оценки напряженного состояния в разных точках образца с учетом главных компонент тензора напряжений была определена интенсивность временных и остаточных напряжений по осям  $O_z$ ,  $O_x$ ,  $O_y$ . Интенсивность остаточных напряжений по Мизесу  $\sigma_i^{ocm}$  вычисляется как<sup>5</sup> [13–15]

$$\sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_z^{ocm} - \sigma_x^{ocm})^2 + (\sigma_x^{ocm} - \sigma_y^{ocm})^2 + (\sigma_y^{ocm} - \sigma_z^{ocm})^2]} = \sigma_i^{ocm}, \quad (1)$$

где  $\sigma_x^{ocm}$ ,  $\sigma_y^{ocm}$ ,  $\sigma_z^{ocm}$  – компоненты остаточных напряжений, действующих по осям  $O_x$ ,  $O_y$ ,  $O_z$ . По аналогичной формуле определяется интенсивность временных напряжений ( $\sigma_i^{вп}$ ).

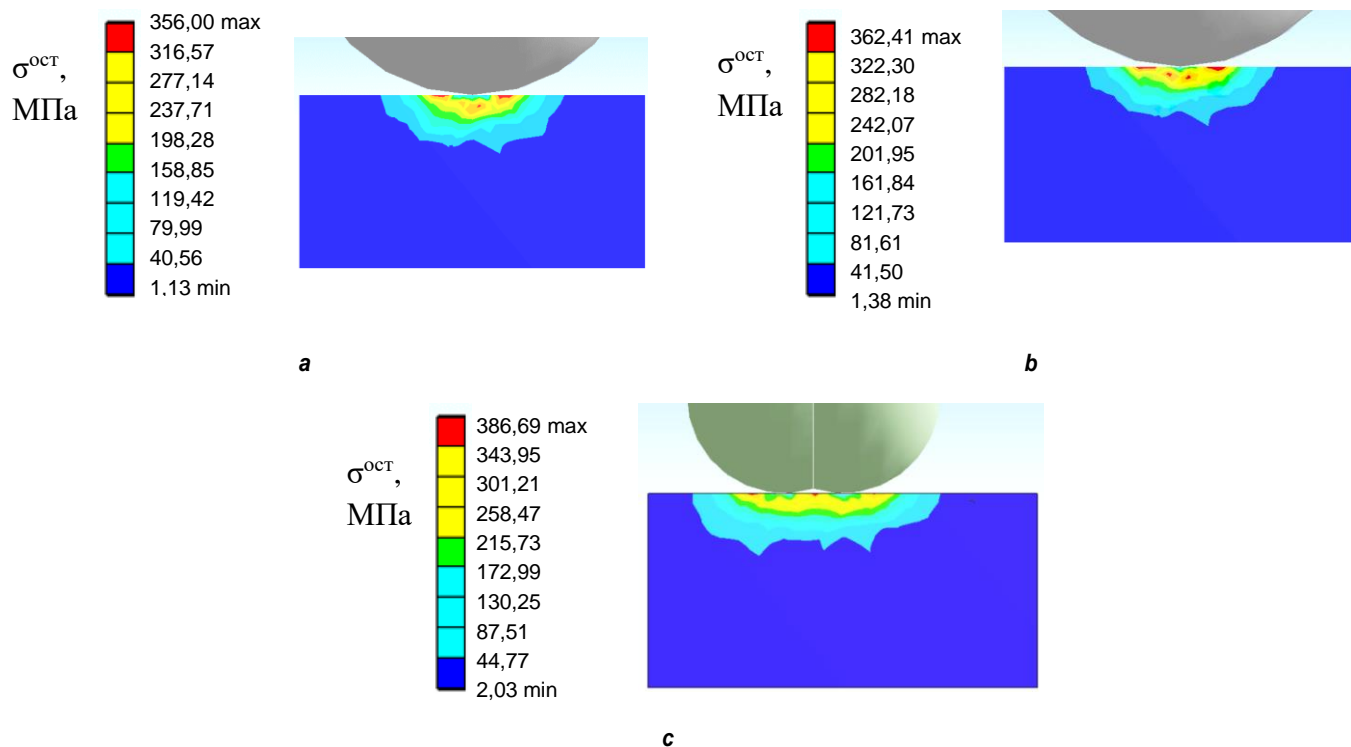
## РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки напряженного состояния материалов обычно используют два параметра: временное и остаточное напряжения. Временные напряжения возникают в очаге де-

формации при действии внешних сил, а остаточные напряжения остаются в деталях после завершения обработки [16]. Остаточные напряжения оказывают большое влияние на усталостную прочность, коррозионную стойкость деталей и другие свойства изделий, которые необходимы при эксплуатации деталей [17–19].

Примеры распределения интенсивности остаточных напряжений в поперечном сечении образца при разных схемах нагружения представлены на рис. 4.

<sup>5</sup>Бруйка В. А., Фокин В. Г., Кураева Я. В. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособ. Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2013. 109 с.

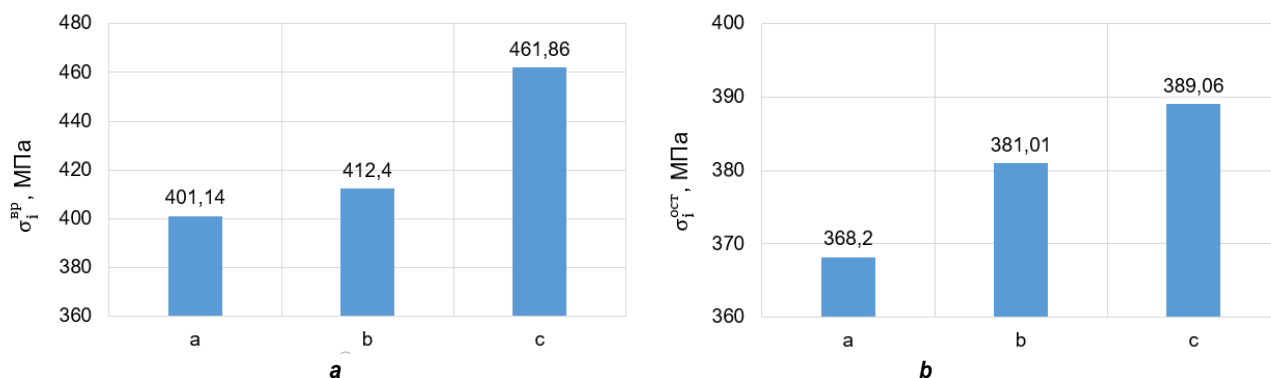


**Рис. 4. Распределение полей интенсивности остаточных напряжений в поперечном сечении образца при разных схемах нагружения (см. рис. 1)**  
**Fig. 4. Distribution of residual stress intensity fields in the sample cross section under different loading schemes (see fig. 1)**

Анализ изополос напряжений в зоне рабочего контакта показывает, что при использовании реверсивного вращения тороидального двухрадиусного ролика (см. рис. 1 с) возникает наибольшая интенсивность максимальных остаточных напряжений, а при статическом – наименьшая интенсивность максимальных остаточных напряжений (см. рис. 1 а). Установлено, что интенсивность

остаточных напряжений сжатия возрастает за счет применения более сложной кинематики деформирующего инструмента с двухрадиусной формой профиля рабочей поверхности.

Интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений в зависимости от принятых схем нагружения представлена на рис. 5.



**Рис. 5. Зависимость интенсивности максимальных временных (а) и остаточных (б) напряжений  $\sigma_i^{BP}$ ,  $\sigma_i^{ост}$  от кинематики тороидального ролика (см. рис. 1)**

**Fig. 5. Dependence of the intensity of maximum temporary (a) and residual (b) stresses  $\sigma_i^{BP}$ ,  $\sigma_i^{ост}$  on toroidal roller kinematics (see fig. 1)**

Как видно из рис. 5, новая кинематика деформирующего инструмента с двухрадиусной формой профиля рабочей поверхности оказывает существенное влияние на повышение интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений. Напряженное состояние в поверхностном слое возрастает в следующей последовательности: статическое воздействие однорадиусного ролика, однорадиусный ролик с реверсивным вращением, двухрадиусный ролик с реверсивным вращением (см. рис. 1). В работе установлено, что при реверсивном вращении двухрадиусного ролика значения временных напряжений больше на 15%, а остаточных напряжений больше на 5,7% по сравнению со значением временных напряжений при статическом воздействии однорадиусного ролика.

Значения компонент максимальных временных напряжений в зоне деформации при разных схемах нагружения представлены в таблице.

Изменение во времени интенсивности и компонент тензора временных напряжений  $\sigma_i^{BP}$ ,  $\sigma_y^{BP}$ ,  $\sigma_x^{BP}$ ,  $\sigma_z^{BP}$  при разных схемах нагружения представлено на рис. 6.

Анализ компонент тензора временных напряжений в зоне рабочего контакта (см. рис. 6) показывает, что при реверсивном вращении рабочего инструмента кривая пластического деформирования имеет пульсирующий характер, а при статическом воздействии рабочего инструмента эти зависимости представляют собой плавные кривые. Реверсивное вращение двухрадиусного ролика (см. рис. 1 с) характеризуется более пульсирующей кривой интенсивности напряжений. Это объясняется тем, что пластические отпечат-

ки на поверхности детали от воздействия тороидального ролика имеют форму эллипса, который, поворачиваясь циклически, изменяет направление главных осей.

При реверсивном вращении тороидального ролика происходит искажение кристаллической структуры материала за счет сдвига зерен в разных направлениях, что способствует росту дислокаций и повышению прочности поверхностного слоя. В результате применения новой кинематики деформирующего инструмента с двухрадиусной формой деформирующей зоны происходит искажение и дробление зеренной структуры материала поверхностного слоя за счет сложных процессов пластического деформирования с накоплением линейных дефектов в виде дислокаций.

Интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений по глубине образца представлена на рис. 7.

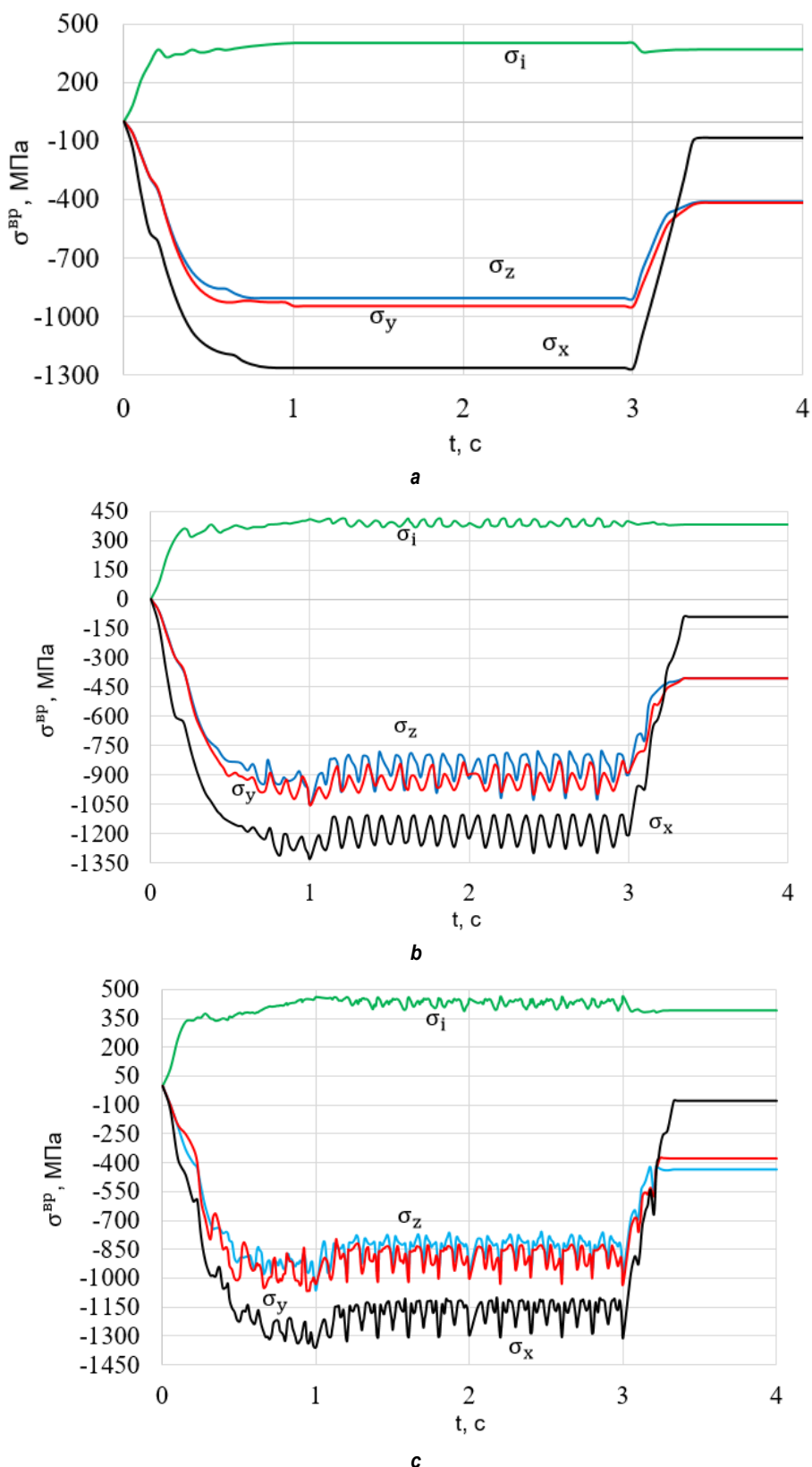
Из рис. 7 видно, что интенсивность максимальных остаточных напряжений при реверсивном вращении двухрадиусного ролика возникает не на поверхности образца, а в некоторой глубине, что согласуется с результатами работы [20]. Для принятых режимов деформационного воздействия эта глубина в 3 раза превышает величину внедрения двухрадиусного ролика. Такой характер изменения напряжений, на наш взгляд, оказывает положительное влияние на дислокационные процессы, которые развиваются внутри поверхностного слоя, что способствует вовлечению в деформационный процесс большего объема материала.

На рис. 8 показано распределение компонент временных и остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя (см. рис. 1 с).

Значения компонент максимальных временных напряжений в зоне деформации при разных схемах нагружения тороидального ролика

Values of the components of maximum temporary stresses in the deformation zone under different loading schemes of the toroidal roller

Схема нагружения (см. рис. 1)	$\sigma_y^{BP}$	$\sigma_x^{BP}$	$\sigma_z^{BP}$
а	-946,86	-1264,6	-903,99
б	-1054,1	-1327,6	-1053,2
в	-1069,4	-1360,2	-1060,25



**Рис. 6. Изменение во времени интенсивности и компонент тензора временных напряжений**

$\sigma_i^{BP}$ ,  $\sigma_y^{BP}$ ,  $\sigma_x^{BP}$ ,  $\sigma_z^{BP}$  при разных схемах нагружения (см. рис. 1)

**Fig. 6. Time variation of intensity and components of the tensor of time stresses**

$\sigma_i^{BP}$ ,  $\sigma_y^{BP}$ ,  $\sigma_x^{BP}$ ,  $\sigma_z^{BP}$  for different loading schemes (see fig. 1)



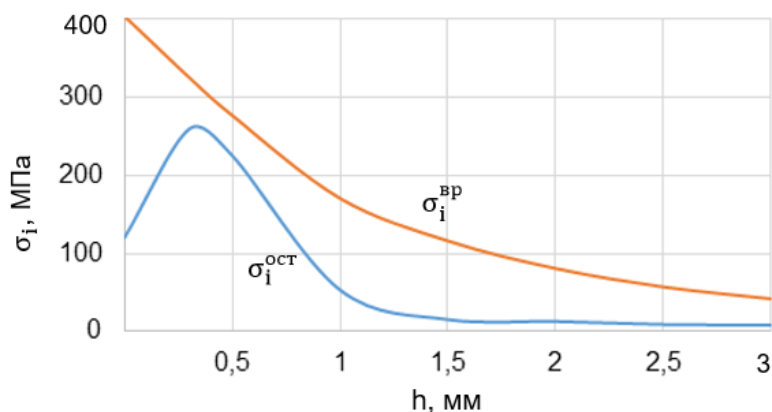


Рис. 7. Распределение интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя ( $h$ ) при реверсивном воздействии двухрадиусного ролика (см. рис. 1 с)  
Fig. 7. Surface layer depth distribution of maximum temporary and residual stress intensity ( $h$ ) under two-radius roller reverse action (see fig. 1 c)

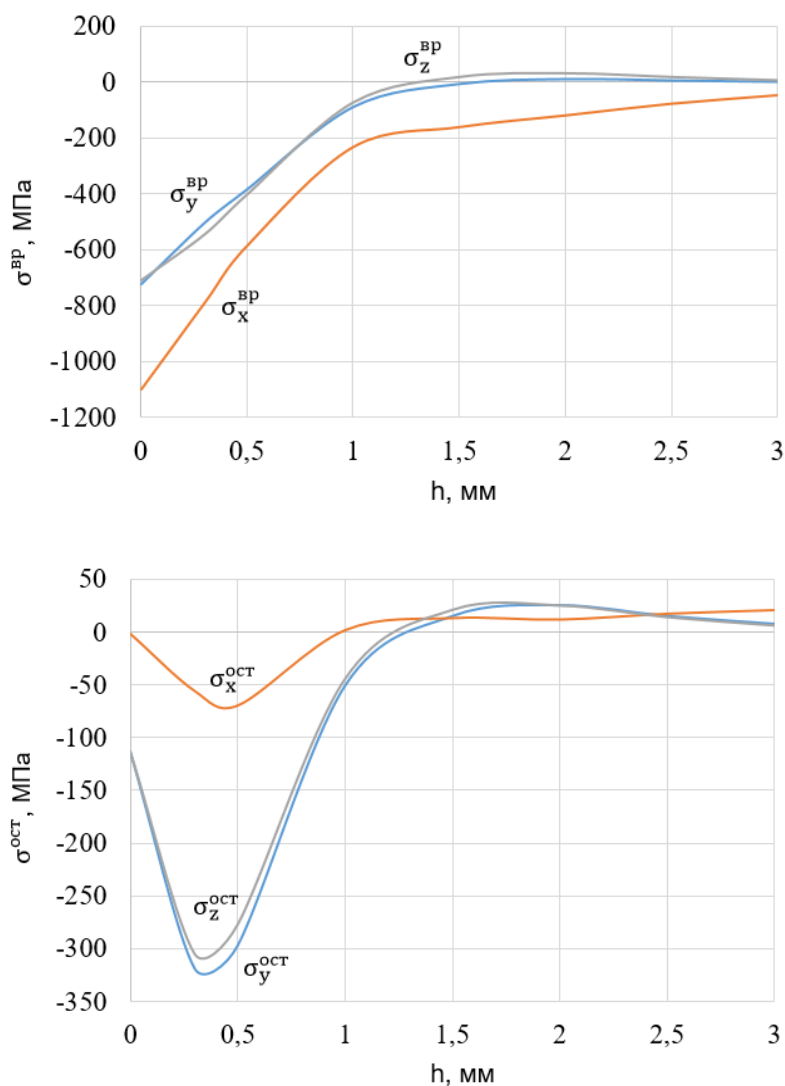


Рис. 8. Распределение компонент тензора временных и остаточных напряжений  $\sigma_y^{\text{ост}}$ ,  $\sigma_x^{\text{ост}}$ ,  $\sigma_z^{\text{ост}}$  по глубине образца при нагружении двухрадиусным роликом (см. рис. 1 с)

Fig. 8. Sample depth distribution of the tensor components of temporary and residual stresses  $\sigma_y^{\text{ост}}$ ,  $\sigma_x^{\text{ост}}$ ,  $\sigma_z^{\text{ост}}$  when loaded by a two-radius roller (see fig. 1 c)

Анализируя полученные на основе конечно-элементного моделирования результаты, можно отметить, что при реверсивном вращении двухрадиусного ролика в поверхностном слое возникают сжимающие временные и остаточные напряжения, а в центральной зоне формируются остаточные напряжения растяжения. Сжимающие максимальные остаточные напряжения  $\sigma_y^{\text{ост}}$  и  $\sigma_z^{\text{ост}}$  формируются на поверхности деталей, а остаточные напряжения  $\sigma_x^{\text{ост}}$  на поверхности детали равны нулю. Зона действия максимальных остаточных напряжений сжатия почти в 5 раз превышает величину натяга при воздействии двухрадиусного ролика.

Максимальные временные напряжения сжатия  $\sigma_x^{\text{вп}}$  при реверсивном вращении двухрадиусного ролика немного меньше по сравнению с полученными при действии статического (без вращения) ролика напряжениями. Это подтверждает идею об использовании реверсивного движения инструмента для интенсификации дислокационных процессов. При статическом действии ролика в основном происходит смятие (сжатие) кристаллов, поэтому сжимающие напряжения достаточно высокие. А при реверсивном движении инструмента зерна «раздвигаются» и для перемещения рабочего инструмента требуются меньшие усилия (напряжения).

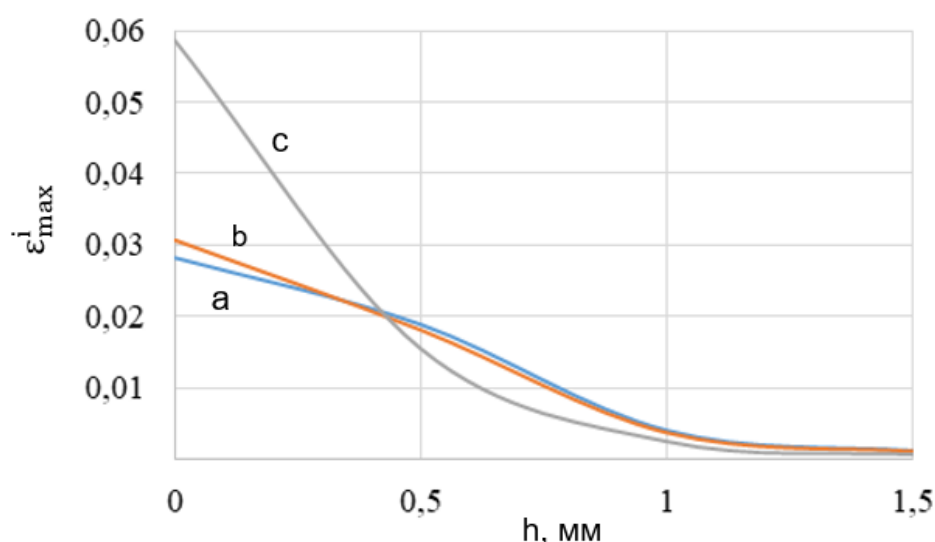
## ДЕФОРМАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ТОРОИДАЛЬНЫМ РОЛИКОМ

При нагружении поверхностного слоя образца тороидальным роликом формируется пластический слой, который изменяет строение и физико-механические свойства металла [21].

На рис. 9 показано распределение максимальной интенсивности деформации по глубине поверхностного слоя при разных условиях нагружения (см. рис. 1).

Из рис. 9 видно, что при разных условиях нагружения (см. рис. 1) максимальная интенсивность деформации достигает своего значения в зоне контакта и убывает в направлении к центру образца; при реверсивном вращении двухрадиусного ролика имеет наибольшую величину, а наименьшую – при статическом упрочнении роликом. Следует отметить, что при реверсивном вращении двухрадиусного ролика значение максимальной интенсивности деформации выше в 2,11 раза по сравнению со значением максимальной интенсивности деформации при статическом упрочнении.

Полученные результаты исследования доказывают эффективность предлагаемого способа отделочно-упрочняющей обработки на основе поверхностного пластического



*Рис. 9. Распределение максимальной интенсивности деформации по глубине поверхностного слоя при разных схемах нагружения (см. рис. 1)*

*Fig. 9. Surface layer depth distribution of the maximum strain intensity under different loading schemes (see fig. 1)*

деформирования с использованием реверсивного движения тороидального рабочего инструмента. С использованием конечно-элементного моделирования установлено, что предлагаемая геометрия рабочего инструмента обеспечивает не только повышение напряжений в зоне деформации, но и повышение остаточных напряжений в упрочненном слое.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для усиления напряженного состояния в очаге упругопластической деформации при поверхностном пластическом деформировании предложен новый способ упрочнения, основанный на реверсивном круговом движении тороидального ролика. Для оценки эффективности предлагаемого процесса разработана динамическая конечно-

элементная модель процесса, позволяющая определить временные напряжения в очаге деформации и остаточные напряжения в упрочненных деталях.

2. Рассмотрено влияние разной формы рабочего инструмента и его кинематика на величину временных и остаточных напряжений. В работе установлено, что при реверсивном вращении двухрадиусного ролика значения временных напряжений более чем на 15% выше по сравнению со значениями временных напряжений при статическом упрочнении, а остаточные напряжения больше на 5,7%. При реверсивном вращении двухрадиусного ролика значение максимальной интенсивности деформации выше в 2,11 раза по сравнению со значением максимальной интенсивности деформации при статическом упрочнении.

## Список источников

1. Отений Я. Н. Технологическое обеспечение качества деталей машин поверхностным пластическим деформированием: монография. Волгоград: Изд-во «Политехник», 2005. 224 с.
2. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Изд-во «Машиностроение», 2002. 300 с.
3. Асланян И. Р. Повышение ресурса подшипников скольжения поверхностным пластическим деформированием. Гл. 7. Обработка деталей поверхностным пластическим деформированием: монография. Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2014. С. 348–383.
4. Зайдес С. А., Емельянов В. Н., Попов М. Е. Деформирующая обработка валов. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2013. 452 с.
5. Зайдес С. А., Забродин В. А., Мураткин В. Г. Поверхностное пластическое деформирование. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2002. 304 с.
6. Приходько В. М., Петрова Л. Г., Чудина О. В. Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий. М.: Изд-во «Машиностроение», 2003. 384 с.
7. Полухин П. И. Сопrotивление пластической деформации металлов и сплавов. М.: Изд-во «Металлургия», 1983. 352 с.
8. 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>.
9. Пат. № 2666205, Российская Федерация, С1, В24В 39/04. Способ поверхностного пластического деформирования / Е. А. Гусева, С. А. Зайдес, Нго Као Кыонг; заявитель и правообладатель Иркутский националь-
- ный исследовательский технический университет. Заявл. 19.12.2017; опубл. 06.09.2018.
10. Пат. № 2758713, Российская Федерация, С1, В24В 39/04. Способ поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения / С. А. Зайдес, Хыу Хай Нгуен; заявитель и правообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. Заявл. 14.01.2021; опубл. 01.11.2021.
11. Дальский А. М., Базаров Б. М., Васильев А. С. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве. М.: Изд-во МАИ, 2003. 364 с.
12. Букатый А. С. Повышение точности изготовления ответственных деталей двигателей средствами статического и динамического моделирования // Известия Самарского научного центра Российской Академии наук. 2014. Т. 16. № 6. С. 374–377.
13. Блюменштейн В. Ю., Смелянский В. М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Изд-во «Машиностроение», 2007. 399 с.
14. Peng Jian, Zhou Peishuang, Wang Ying, Dai Qiao, Knowles D., Mostafavi M. Stress triaxiality and lode angle parameter characterization of flat metal specimen with inclined notch // Metals. 2021. Vol. 11. Iss. 10. P. 1627. <https://doi.org/10.3390/met11101627>.
15. Bi Yueqi, Yuan Xiaoming, Lv Jishuang, Bashir Rehmat, Wang Shuai, Xue He. Effect of yield strength distribution welded joint on crack propagation path and crack mechanical tip field // Materials. 2021. Vol. 14. Iss. 17. P. 4947. <https://doi.org/10.3390/ma14174947>.
16. Liu Haijun, Yang Tao, Han Jiang, Tian Xiaoqing, Chen Shan, Lu Lei. Obtainment of residual stress distribution from surface deformation under continuity constraints for

thinned silicon wafers // *Machines*. 2021. Vol. 9. Iss. 11. P. 284. <https://doi.org/10.3390/machines9110284>.

17. Зайдес С. А. Остаточные напряжения и качество калиброванного металла. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1992. 198 с.

18. Baumann M., Selbmann R., Milbrandt M., Kräusel V., Bergmann M. Adjusting the residual stress state in wire drawing products via in-process modification of tool geometries // *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 9. P. 2157. <https://doi.org/10.3390/ma14092157>.

19. Безъязычный В. Ф., Голованов Д. С. Расчетное определение остаточных напряжений в поверхностном слое обрабатываемой детали при дорновании // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2012. № 10. С. 15–20.

20. Зайдес С. А., Нго К. К. Поверхностное деформирование в стесненных условиях: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2018. 234 с.

21. Xu Yilun, Balint D. S., Dini D. On the origin of plastic deformation and surface evolution in nano-fretting: a discrete dislocation plasticity analysis // *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 21. P. 6511. <https://doi.org/10.3390/ma14216511>.

22. Пат. № 2530600, Российская Федерация, С1, В24В 39/04. Ролик обкатной двухрадиусный / В. Ю. Блюменштейн, А. А. Кречетов, М. С. Махалов, О. А. Останин; заявитель и правообладатель Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева. № 2013135794/02. Заявл. 30.07.2013; опубл. 10.10.2014. Бюл. № 28 (II ч.). 7 с.

## References

1. Otenij Ya. N. *Technological assurance of machine part quality by surface plastic deformation*. Volgograd: Politehnik; 2005, 224 p. (In Russ.).

2. Smelyansky V. M. *Mechanics of part hardening by surface plastic deformation*. Moscow: Mashinostroenie; 2002, 300 p. (In Russ.).

3. Aslanyan I. R. *Improving sliding bearing life by surface plastic deformation*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2014, p. 348-383. (In Russ.).

4. Zaides S. A., Emel'yanov V. N., Popov M. E. *Deforming processing of shafts*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2013, 452 p. (In Russ.).

5. Zaides S. A., Zabrodin V. A., Muratkin V. G. *Surface plastic deformation*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2002, 304 p. (In Russ.).

6. Prihod'ko V. M., Petrova L. G., Chudina O. V. *Metal physical basis for hardening technology development*. Moscow: Mashinostroenie; 2003, 384 p. (In Russ.).

7. Polukhin P. I. *Resistance to plastic deformation of metals and alloys*. Moscow: Metallurgiya; 1983, 352 p. (In Russ.).

8. Zaydes S. A. New surface plastic deformation techniques in the manufacture of machine parts. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova = 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>.

9. Guseva E. A., Zaides S. A., Kyong Ngo Kao. *The method of surface plastic deformation*. Patent RF, no. 2666205; 2018. (In Russ.).

10. Zaides S. A., Nguen Hyu Haj. *The method of surface plastic deformation of the outer surfaces of solids of revolution*. Patent RF, no. 2758713; 2021. (In Russ.).

11. Dalsky A. M., Bazarov B. M., Vasiliev A. S. *Technological heredity in machine-building production*. Moscow: Moscow Aviation Institute; 2003, 364 p. (In Russ.).

12. Bukatiy A. S. Improving the accuracy of manufacturing the engines critical parts by means of static and dynamic modeling. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014;16(6):374-377. (In Russ.).

13. Blumenstein V. Yu., Smelyansky V. M. *Mechanics of technological heredity at the stages of machine part processing and operation*. Moscow: Mashinostroenie; 2007, 399 p. (In Russ.).

14. Peng Jian, Zhou Peishuang, Wang Ying, Dai Qiao, Knowles D., Mostafavi M. Stress triaxiality and lode angle parameter characterization of flat metal specimen with inclined notch. *Metals*. 2021;11(10):1627. <https://doi.org/10.3390/met11101627>.

15. Bi Yueqi, Yuan Xiaoming, Lv Jishuang, Bashir Rehmat, Wang Shuai, Xue He. Effect of yield strength distribution welded joint on crack propagation path and crack mechanical tip field. *Materials*. 2021;14(17):4947. <https://doi.org/10.3390/ma14174947>.

16. Liu Haijun, Yang Tao, Han Jiang, Tian Xiaoqing, Chen Shan, Lu Lei. Obtainment of residual stress distribution from surface deformation under continuity constraints for thinned silicon wafers. *Machines*. 2021;9(11):284. <https://doi.org/10.3390/machines9110284>.

17. Zaides S. A. *Residual stresses and calibrated metal quality*. Irkutsk: Irkutsk State University; 1992, 198 p. (In Russ.).

18. Baumann M., Selbmann R., Milbrandt M., Kräusel V., Bergmann M. Adjusting the residual stress state in wire drawing products via in-process modification of tool geometries. *Materials*. 2021;14(9):2157. <https://doi.org/10.3390/ma14092157>.

19. Bezyazychnyi V. F., Golovanov D. S. Calculation of residual stresses of component surface layer when burnishing. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*. 2012;10:15-20. (In Russ.).

20. Zaides S. A., Ngo K. K. *Surface deformation in constrained conditions*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2018, 234 p. (In Russ.).

21. Xu Yilun, Balint D. S., Dini D. On the origin of plastic deformation and surface evolution in nano-fretting: a discrete dislocation plasticity analysis. *Materials*. 2021;14(21):6511. <https://doi.org/10.3390/ma14216511>.

22. Blyumenshtein V. Yu., Krechetov A. A., Makhalov M. S., Ostanin O. A. *Double radius roller*. Patent RF, no. 2530600; 2014. (In Russ.).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Зайдес Семен Азикович,**  
доктор технических наук, профессор,  
кафедра материаловедения, сварочных и  
аддитивных технологий,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

**Нгуен Хыу Хай,**  
аспирант,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

**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 19.04.2022; одобрена после рецензирования 15.09.2022; принята к публикации 06.12.2022.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Semen A. Zaides,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Department of Materials Science, Welding  
and Additive Technologies,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

**Hai Nguyen Huu,**  
Postgraduate Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

**Contribution of the authors**

The authors contributed equally to the preparation of the 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 19.04.2022; approved after reviewing 15.09.2022; accepted for publication 06.12.2022.