

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

## METAL FORMING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.787.4

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-48-59



### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕЛИКОИДНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЯХ

Зайдес С.А., Ву Куанг Хай

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**Аннотация.** Актуальность работы. Упрочнение нежёстких цилиндрических элементов (валов и осей) представляет собой сложную технологическую задачу, требующую обеспечения стабильных механических свойств по всей длине при строгом сохранении диаметральных размеров, поскольку чрезмерное радиальное воздействие вызывает изгиб заготовки. Эффективное решение этой проблемы, предложенное в ИРНТИУ, заключается в использовании нового метода поверхностного пластического деформирования (ППД) геликоидным инструментом – тороидальным роликом с винтовым профилем, который позволяет повысить уровень напряжённого состояния в зоне деформации без увеличения радиального натяга. **Цель работы.** На основе конечно-элементного анализа определить оптимальные режимы ППД с использованием геликоидного ролика, обеспечивающие максимальное напряжённое состояние в зоне контакта, высокие остаточные сжимающие напряжения и значительную глубину наклёпа упрочняемого материала. **Методика.** С применением программных комплексов для 3D-моделирования (SolidWorks v21) и численного расчёта (Ansys Workbench 19.2) были проведены вычисления, позволившие установить зависимости временных и остаточных напряжений, а также глубины пластической деформации от ключевых параметров процесса геликоидного упрочнения. **Результаты исследования.** На основе анализа результатов конечно-элементного моделирования установлены рациональные режимы геликоидного ППД ( $t=0,1$  мм,  $s=0,1$  мм/об,  $n_{инн} = n_{заг} = 100$  об/мин), обеспечивающие формирование максимально возможного напряженно-деформированного состояния упрочнённых деталей. **Практическая значимость.** Полученные результаты моделирования показывают, что использование геликоидного инструмента при ППД позволяет существенно повысить уровень напряжённого состояния в зоне деформации. Это обеспечивает более глубокое упрочнение материала и улучшение эксплуатационных свойств поверхностного слоя.

**Ключевые слова:** геликоидный инструмент, временное напряжение, остаточное напряжение, компьютерное моделирование, поверхностное пластическое деформирование, глубина пластической деформации

© Зайдес С.А., Ву Куанг Хай, 2026

#### Для цитирования

Зайдес С.А., Ву Куанг Хай. Оценка влияния параметров геликоидного упрочнения на распределение напряжений и деформаций в цилиндрических деталях // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 48-59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-48-59>



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

# ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF HELICOIDAL STRENGTHENING PARAMETERS ON THE STRESS AND STRAIN DISTRIBUTION IN CYLINDRICAL PARTS

Zaydes S.A., Vu Quang Khai

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract. Relevance.** Strengthening of non-rigid cylindrical components (shafts and axles) represents a complex technological task that requires maintaining stable mechanical properties along the entire length while strictly preserving diametrical dimensions, since excessive radial loading can cause workpiece bending. An effective solution to this problem, proposed at Irkutsk National Research Technical University, involves the use of a new method of surface plastic deformation (SPD) employing a helicoidal tool - a toroidal roller with a helicoidal profile. This tool design makes it possible to increase the stress level in the deformation zone without increasing the radial interference. **Objectives.** The research is aimed at determining the optimal SPD parameters by finite-element analysis when using a helicoidal roller that provide maximum stress state in the contact zone, high residual compressive stresses, and significant work-hardening depth in the strengthened material. **Methods Applied.** Using software packages for 3D modeling (SolidWorks v21) and numerical simulation (ANSYS Workbench 19.2), calculations have been performed that make it possible to determine the relationships between transient and residual stresses, as well as the depth of plastic deformation, and the key parameters of the helicoidal strengthening process. **Results.** Based on the analysis of the finite-element simulation, rational operating parameters for helicoidal SPD have been identified ( $t = 0,1$  mm,  $s = 0,1$  mm/rev,  $n_{oo} = n_{wp} = 100$  rev/m), ensuring the formation of the highest possible stress-strain state in the strengthened components. **Practical Relevance.** The obtained simulation results show that the use of a helicoidal tool during SPD can significantly increase the stress level in the deformation zone. This leads to deeper material strengthening and improved performance characteristics of the surface layer.

**Key words:** helicoidal tool, temporary stress, residual stress, computer modeling, surface plastic deformation, depth of plastic deformation

## For citation

Zaydes S.A., Vu Quang Khai. Assessment of the Influence of Helicoidal Strengthening Parameters on the Stress and Strain Distribution in Cylindrical Parts. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 48-59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-48-59>

## Введение

Среди разнообразных методов упрочнения деталей машин особое место занимают способы поверхностного пластического деформирования (ППД), которые используют для повышения надёжности деталей машин и транспортно-технологической техники [1].

По сравнению с традиционными методами поверхностного упрочнения, такими как термическая, химико-термическая, лазерная обработка или нанесение покрытий, поверхностное пластическое деформирование обладает рядом существенных преимуществ [2]. Метод обеспечивает упрочнение без заметного увеличения размеров и без риска коробления при формировании упрочнённого слоя за счёт собственных резервов пластичности материала. Кроме того, ППД характеризуется высокой производительностью и экономичностью, не требуя энергоёмких печей, сложных технологических циклов или применения дорогостоящих материалов [3, 4].

На практике наиболее широко применяют способы, основанные на обкатывании и раскатывании шариковыми и роликовыми обкатниками. Тороидальные

ролики представляют собой высокоэффективные рабочие элементы в процессах поверхностного пластического деформирования. Их использование позволяет формировать упрочнённый приповерхностный слой и снижать микронеровности благодаря регулируемому воздействию вращающихся контактных поверхностей [5, 6]. Тороидальные ролики достаточно просты по конструкции, а эффективность упрочнения зависит от технологических параметров и геометрии инструмента: контактное давление (величина прижима), радиус ролика, профиль ролика, число проходов, подача, относительная скорость и технологическая смазка [7, 8].

Для упрочнения осей и валов, представляющих собой нежёсткие цилиндрические детали, необходимо учитывать несколько технологических аспектов. Основная проблема заключается в достижении равномерных механических свойств по длине детали и сохранении точности размеров, особенно диаметральных. Одним из возможных подходов является повышение напряжённого состояния в зоне деформации, не увеличивая при этом радиальный натяг, кото-

рый может вызвать деформацию заготовки во время обработки [9, 10].

В настоящее время для решения этой задачи разработаны различные способы поверхностного пластического деформирования, которые включают в себя применение инновационных конструкций инструментов и более сложные кинематические схемы. Эти подходы позволяют улучшить технологический процесс и повысить эффективность упрочнения [11–13]. В исследовании [11] предложен новый инструмент, представляющий собой двухрадиусный ролик с реверсивным движением. Эта конструкция способствует улучшению механических свойств упрочнённого слоя, увеличивая интенсивность напряжений в зоне деформации и создавая остаточные сжимающие напряжения в поверхностном слое деталей машин. В монографии [12] представлены технологические процессы ППД на основе новых кинематических схем упрочнения: маятниковое, осциллирующее, орбитальное, которые повышают эффективность упрочнения нежестких деталей.

Авторами статьи разработан новый метод и рабочий инструмент для поверхностного пластического деформирования, использующие геликоидный рабочий инструмент [13]. Этот инструмент представляет собой тороидальный ролик с винтовым профилем деформирующего элемента.

Основная цель данного исследования заключается в определении оптимальных технологических режимов обработки процесса поверхностного пластического деформирования с использованием геликоидного инструмента на основе результатов конечно-элементного моделирования. Это позволит обеспечить максимальное напряжённое состояние в зоне

деформации, добиться максимальных остаточных сжимающих напряжений и оптимальной глубины наклёпа в упрочнённых деталях.

### Схема геликоидного ППД

Новый способ ППД поясняется на рис. 1, где показана конструкция геликоидного инструмента, выполненного в виде винтовой поверхности, состоящей из двух витков с профильным радиусом  $r_{пр}$  и шагом  $h$ . Витки расположены под углом к оси инструмента в горизонтальной плоскости, а ось инструмента расположена параллельно оси заготовки. Кинематику процесса определяют следующие основные параметры: радиальный натяг  $t$ , частота вращения инструмента  $n_{ин}$ , частота вращения заготовки  $n_{заг}$  и продольная подача  $s$ , направление витков и направление подачи.

Ранее проведенные результаты моделирования показали, что схема геликоидного поверхностного пластического деформирования, при которой рабочий инструмент имеет правое направление витка, а направление подачи совпадает с направлением его движения, направление вращения инструмента противоположно направлению вращения заготовки и является самой эффективной схемой упрочнения.

Основная идея способа ППД заключается в следующем: заготовка 2 устанавливается на токарно-винторезном станке, фиксируется в трёхкулачковом патроне и поддерживается вращающимся центром задней бабки (см. рис. 1). Заготовка вращается с частотой  $n_{заг}$  (об/мин). Инструмент 1 одновременно получает радиальный натяг  $t$ , продольную подачу  $s$  и вращается вокруг своей оси с частотой  $n_{ин}$ .

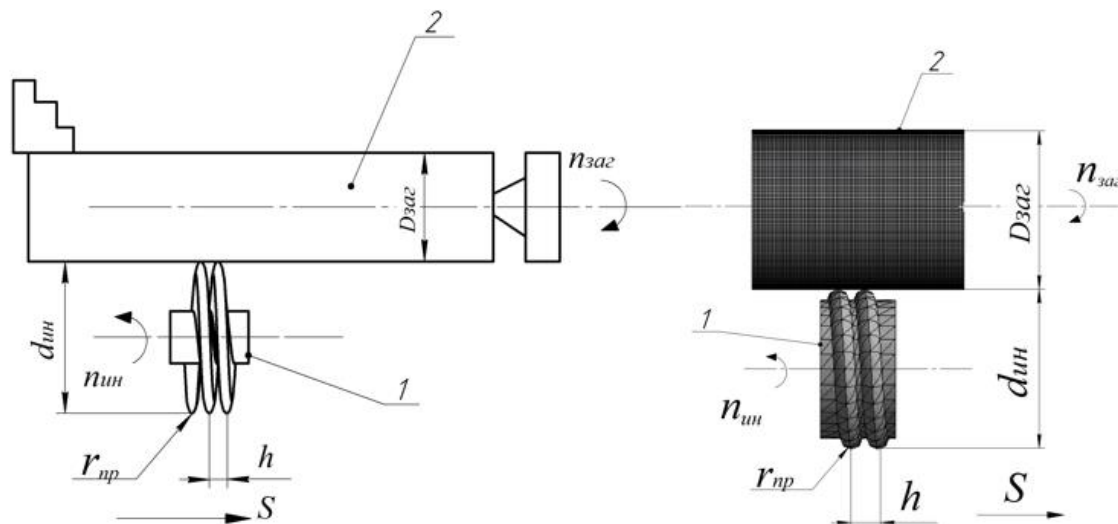


Рис. 1. Кинематическая схема геликоидного ППД и конечно-элементная модель деформирования цилиндрической заготовки: 1 – рабочий инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка;  $r_{пр}$  – профильный радиус;  $d_{ин}$  – диаметр инструмента;  $D_{заг}$  – диаметр заготовки;  $h$  – шаг витка инструмента

Fig. 1. Kinematic diagram of helical surface plastic deformation and finite element model of cylindrical workpiece deformation: 1 is working tool; 2 is workpiece;  $r_{pr}$  is profile radius;  $d_{tool}$  is tool diameter;  $D_{wp}$  is workpiece diameter;  $h$  is tool thread pitch

### Конечно-элементное моделирование напряжённого состояния упрочнённых деталей

Для анализа напряжённого состояния поверхностного слоя при различных методах ППД, а также для оценки остаточных и временных напряжений и толщины упрочнённого слоя используется метод конечных элементов (МКЭ). Одной из наиболее распространённых программ для этих целей является ANSYS [14, 15]. Для численного моделирования напряженно-деформированного состояния при ППД была построена геометрическая модель, состоящая из цилиндрической заготовки и инструмента с винтовой поверхностью (см. рис. 1). Заготовка имеет диаметр  $D_{\text{заг}} = 30$  мм и выполнена из стали Ст 45 с упругопластическими характеристиками: модуль упругости  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ . Диаграмма деформации материала является билинейной (предел текучести  $\sigma_T = 360$  МПа, модуль упрочнения  $E_T = 1,45 \cdot 10^3$  МПа, предел прочности  $\sigma_b = 600$  МПа). Инструмент принят как абсолютно жёсткий, диаметром  $d_{\text{ин}} = 30$  мм, с винтовой поверхностью и шагом  $h = 5$  мм и радиусом скругления на рабочей поверхности  $r_{\text{пр}} = 2$  мм.

С использованием CAD/CAE-системы Ansys 19.2 была создана конечно-элементная модель цилиндрического образца с тетраэдрической формой конечных элементов, размер ячеек составил 0,5 мм. Коэффициент трения в зоне контакта принят равным  $f = 0,1$ . Моделирование процесса геликоидного ППД проводилось с использованием основных режимов упрочнения, которые представлены в таблице.

Таблица. Основные режимы упрочнения геликоидным ППД

Table. Main hardening modes of helicoidal surface plastic deformation (SPD)

$n_{\text{заг}}$ , об/мин	$n_{\text{ин}}$ , об/мин	$t$ , мм	$s$ , мм/об
100	100	0,1	0,1

Для оценки напряжённого состояния в различных точках цилиндрических образцов были определены главные компоненты тензора напряжений вдоль осей Oz (осевые  $\sigma_z$ ), Oy (тангенциальные  $\sigma_\phi$ ) и Ox (радиальные  $\sigma_r$ ). Остаточное напряжённое состояние в каждой точке материала оценивалось через интенсивность напряжения  $\sigma_i^{\text{ост}}$ , рассчитанную по формуле [16]

$$\sigma_i^{\text{ост}} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_z^{\text{ост}} - \sigma_\phi^{\text{ост}})^2 + (\sigma_\phi^{\text{ост}} - \sigma_r^{\text{ост}})^2 + (\sigma_r^{\text{ост}} - \sigma_z^{\text{ост}})^2]}. \quad (1)$$

По аналогической формуле определена и интенсивность временных напряжений  $\sigma_i^{\text{вр}}$ .

Интенсивность напряжений – это частный случай эквивалентного напряжения, когда прочность материала оценивается по энергетической теории Губера-Мизеса-Генки. Касательные напряжения, которые активно формируются при геликоидном ППД и обеспечивают эффективное деформирование поверхност-

ного слоя, учитываются при расчете главных напряжений в формуле (1). В современных инженерных расчетах это делается автоматически. Программа для каждой точки тела вычисляет тензор напряжений, находит главные напряжения и по ним считает интенсивность напряжений [17].

### Результаты моделирования и расчета напряженно-деформированного состояния упрочнённых деталей

**Влияние радиального натяга.** На рис. 2 показано влияние величины радиального натяга на максимальные осевые и тангенциальные остаточные сжимающие напряжения, а на рис. 3 – влияние радиального натяга на интенсивность максимальных временных и остаточных сжимающих напряжений.

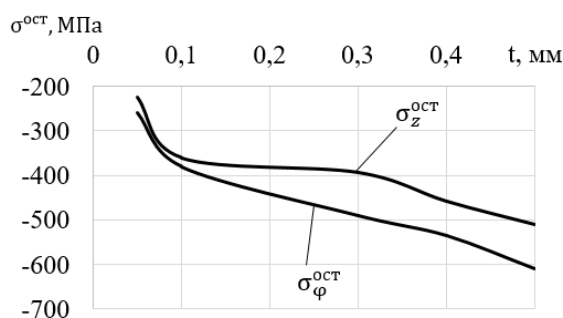


Рис. 2. Влияние радиального натяга на максимальные осевые и тангенциальные остаточные сжимающие напряжения

Fig. 2. Influence of radial interference on maximum axial and tangential residual compressive stresses

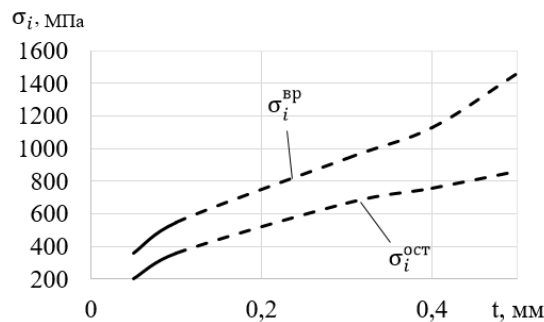


Рис. 3. Влияние радиального натяга на максимальную интенсивность временных и остаточных сжимающих напряжений

Fig. 3. Influence of radial interference on the maximum intensity of transient and residual compressive stresses

Анализ данных, представленных на рис. 2 и 3, позволяет заключить, что при увеличении радиального натяга  $t$  от 0,05 до 0,5 мм максимальная интенсивность временных и остаточных сжимающих напряжений возрастает в 4–4,2 раза, в то время как тангенциальные и осевые остаточные напряжения сжатия увеличиваются в 2,3 раза. При значении натяга  $t \geq 0,1$  интенсивность временных напряжений превышает предел

прочности материала ( $\sigma_b = 600$  МПа), а интенсивность остаточных напряжений – предел текучести материала ( $\sigma_T = 360$  МПа), что является недопустимым при ППД, так как приводит к снижению несущей способности деталей. Отсюда следует, что рациональная величина радиального натяга при геликоидном ППД составляет  $t = 0,1$  мм, что убедительно согласуется с известными в технологии ППД значениями [18].

**Влияние продольной подачи.** На рис. 4 показано распределение интенсивности остаточных напряжений по поперечному сечению образцов в зависимости от величины продольной подачи. Из рис. 4 следует, что при весьма малой величине продольной подачи происходит существенный рост остаточных

напряжений, интенсивность которых превышает предел текучести материала. Это происходит благодаря интенсификации временных напряжений при наложении следов обработки. А при большой величине продольной подачи инструмент обрабатывает поверхностный слой с большим шагом, в результате чего степень упрочнения снижается, а неравномерность распределения остаточных напряжений увеличивается.

На рис. 5 показано влияние величины продольной подачи на максимальные осевые и тангенциальные остаточные напряжения, а на рис. 6 – влияние продольной подачи на интенсивность максимальных временных и остаточных сжимающих напряжений.

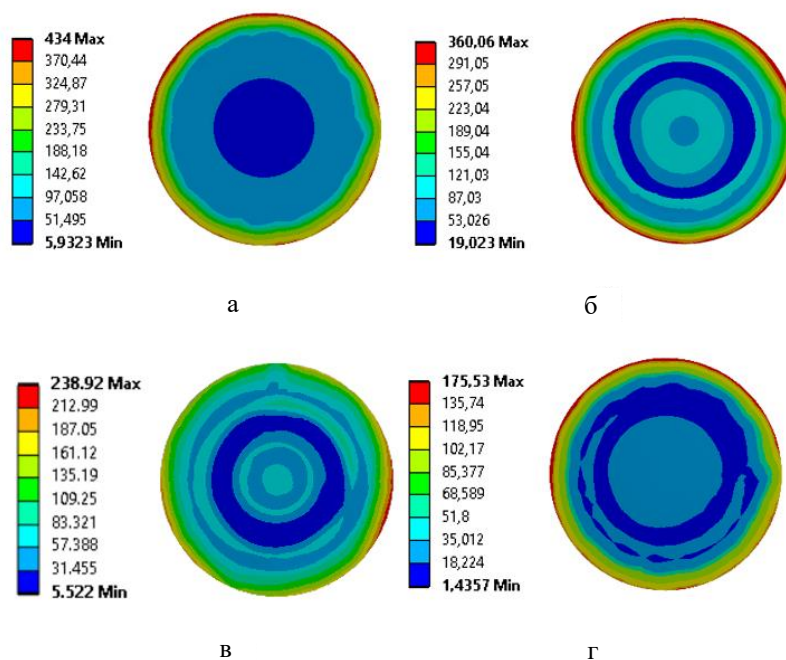


Рис. 4. Распределение интенсивности остаточных напряжений по поперечному сечению деталей при разных значениях продольной подачи  $s$ : а –  $s = 0,05$  мм/об; б –  $s = 0,1$  мм/об; в –  $s = 0,2$  мм/об; г –  $s = 0,4$  мм/об  
 Fig. 4. Residual stress intensity distribution for cross-section of the parts at different longitudinal feed values  $s$ : а is  $s=0,05$  mm/rev; б is  $s=0,1$  mm/rev; в is  $s=0,2$  mm/rev; г is  $s=0,4$  mm/rev

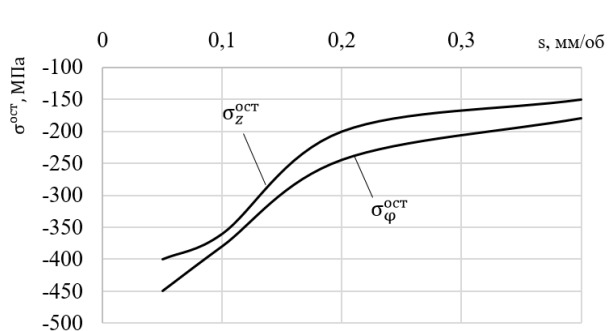


Рис. 5. Влияние величины продольной подачи на максимальные осевые и тангенциальные сжимающие остаточные напряжения  
 Fig. 5. Influence of longitudinal feed value on maximum axial and tangential residual compressive stresses

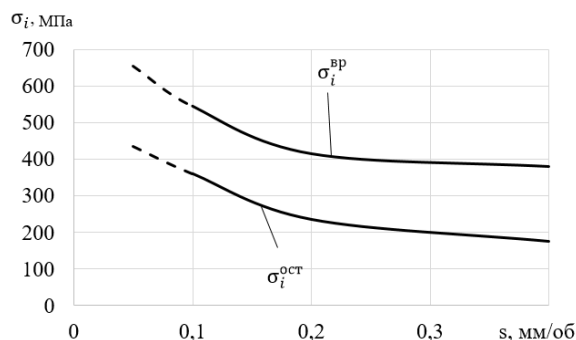


Рис. 6. Влияние величины продольной подачи на интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений  
 Fig. 6. Influence of longitudinal feed value on the intensity of maximum transient and residual stresses

Анализ данных, представленных на рис. 5 и 6, позволяет сделать вывод, что при увеличении продольной подачи  $s$  от 0,05 до 0,4 мм/об максимальная интенсивность временных и остаточных напряжений снижается на 72 и 148% соответственно, в то время как тангенциальные и осевые остаточные напряжения сжатия уменьшаются в 2,50–2,67 раза. При значении подачи  $s < 0,1$  мм/об интенсивность остаточных напряжений превышает предел текучести материала ( $\sigma_T = 360$  МПа), что является недопустимым для процесса ППД, поскольку это приводит к устранению остаточных напряжений. Следовательно, рациональной величиной продольной подачи является  $s = 0,1$  мм/об, что согласуется с общепринятыми режимами обработки в технологии ППД [19].

**Влияние частоты вращения рабочего инструмента.** Если диаметр заготовки и деформирующего инструмента равны по величине и вращаются в противоположных направлениях, то для гладкого торoidalного ролика это означает, что процесс деформирования происходит в условиях качения в зоне контакта. Геликоидный ролик в аналогичных условиях работает в условиях качения с проскальзыванием за счет винтовой формы деформирующего элемента.

Рассмотрим напряжённое состояние образца при одинаковых скоростях вращения инструмента и заготовки. На рис. 7 представлено влияние частоты вращения рабочего инструмента и заготовки на величину максимальных осевых и тангенциальных остаточных напряжений, в то время как на рис. 8 показано влияние этих параметров на интенсивность временных и остаточных напряжений.

Анализ рис. 7 и 8 показывает, что при повышении частоты вращения инструмента и заготовки с 50 до 400 об/мин наблюдается рост максимальных значений как временных, так и остаточных напряжений: первые увеличиваются примерно на 30%, вторые – на 36%. При этом уровни тангенциальных и осевых остаточных напряжений сжатия также возрастают на 27 и 33% соответственно. Пунктирные кривые на рис. 8 указывают на диапазоны частот, при достижении которых материал находится в критическом состоянии: для остаточных напряжений этим пределом является предел текучести, а для временных – предел прочности при растяжении. Таким образом, рациональная частота вращения инструмента и заготовки составляет 100 об/мин, так как при данной частоте вращения остаточные напряжения достигают величины, близкой к пределу текучести материала ( $\sigma_T = 360$  МПа).

Рассмотрим НДС упрочнённых деталей, когда пластическая деформация происходит в условиях скольжения, когда частота вращения заготовки и инструмента разные. Зависимость напряженно-деформированного состояния деталей от частоты вращения рабочего инструмента представлена на рис. 9 и 10. При этом частота вращения заготовки составляет 100 об/мин. На рис. 9 показано влияние частоты вращения рабочего инструмента на величину максимальных осевых и тангенциальных остаточных напряжений. На рис. 10 представлена зависимость интенсивности временных и остаточных напряжений от изменения данного технологического параметра.

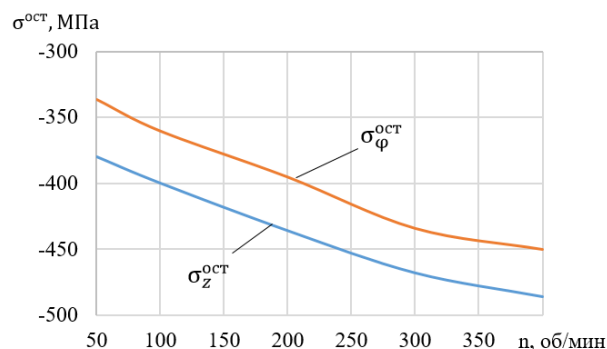


Рис. 7. Влияние частоты вращения рабочего инструмента  $n_{ин}$  и заготовки  $n_{заг}$  на максимальные осевые и тангенциальные остаточные сжимающие напряжения

Fig. 7. Influence of the rotational speed of the working tool  $n_{tool}$  and workpiece  $n_{wp}$  on the maximum axial and tangential residual compressive stresses

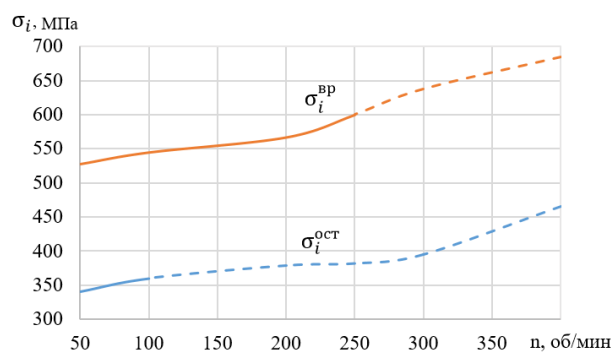


Рис. 8. Влияние частоты вращения рабочего инструмента  $n_{ин}$  и заготовки  $n_{заг}$  на интенсивность временных и остаточных напряжений

Fig. 8. Influence of the rotational speed of the working tool  $n_{tool}$  and workpiece  $n_{wp}$  on the intensity of transient and residual stresses

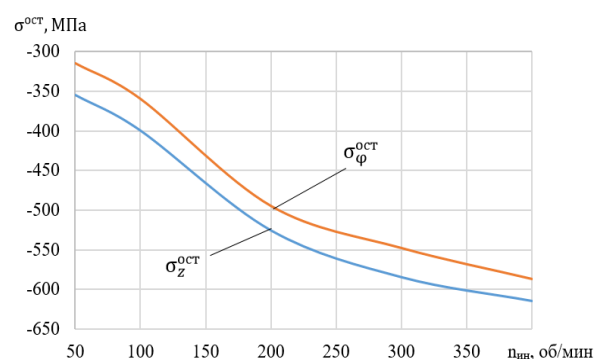


Рис. 9. Влияние частоты вращения рабочего инструмента  $n_{ин}$  на предельные значения осевых и тангенциальных остаточных сжимающих напряжений

Fig. 9. Influence of the working tool rotational speed  $n_{tool}$  on the limiting values of axial and tangential residual compressive stresses

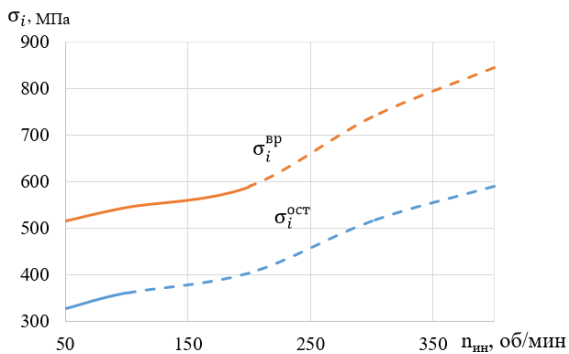


Рис. 10. Зависимость интенсивности временных и остаточных напряжений от частоты вращения рабочего инструмента  $n_{инн}$   
 Fig. 10. Dependence of the intensity of transient and residual stresses on the rotation speed of the working tool  $n_{tool}$

Анализ данных, представленных на рис. 9 и 10, показывает, что при увеличении частоты вращения рабочего инструмента  $n_{инн}$  в диапазоне от 50 до 400 об/мин наблюдается рост максимальных значений интенсивности как временных, так и остаточных напряжений на 63 и 80% соответственно. Одновременно с этим величины тангенциальных и осевых остаточных сжимающих напряжений возрастают на 73 и 86%. Установлено, что при  $n_{инн} > 100$  об/мин максимальная интенсивность остаточных сжимающих напряжений превышает предел текучести материала ( $\sigma_T = 360$  МПа). При дальнейшем увеличении частоты вращения, а именно при  $n_{инн} > 200$  об/мин, интенсивность временных напряжений становится выше пре-

дела прочности материала ( $\sigma_B = 600$  МПа). Как и следовало ожидать, процесс скольжения сопровождается повышением напряжённого состояния материала заготовки.

Распределение интенсивности остаточных напряжений по поперечному сечению детали в зависимости от частоты вращения рабочего инструмента представлено на рис. 11. По рис. 11, а можно отметить, что при низкой частоте вращения инструмента ( $n_{инн} = n_{заг} = 100$  об/мин) интенсивность остаточных напряжений распределяется более равномерно по поперечному сечению образца. В поверхностном слое формируются остаточные напряжения, максимальная интенсивность которых приближена к пределу текучести материала. При относительно высоких скоростях вращения инструмента (рис. 11, б-г) распределение остаточных напряжений становится менее равномерным и в поверхностном слое, и по сечению образцов, что объясняется сложностью механических процессов качения и скольжения, которые происходят не только из-за разных частот вращения заготовки и инструмента, но и за счет винтовой формы деформирующего инструмента. Необходимо отметить, что увеличение частоты вращения инструмента по сравнению с частотой вращения заготовки может привести к снижению равномерности упрочнения и формированию локальных зон концентрации напряжений.

Для оценки однородности распределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей представлены данные численного моделирования (рис. 12), позволяющие проанализировать пространственное распределение интенсивности остаточных напряжений как вдоль оси, так и по периметру поперечного сечения цилиндрической заготовки.

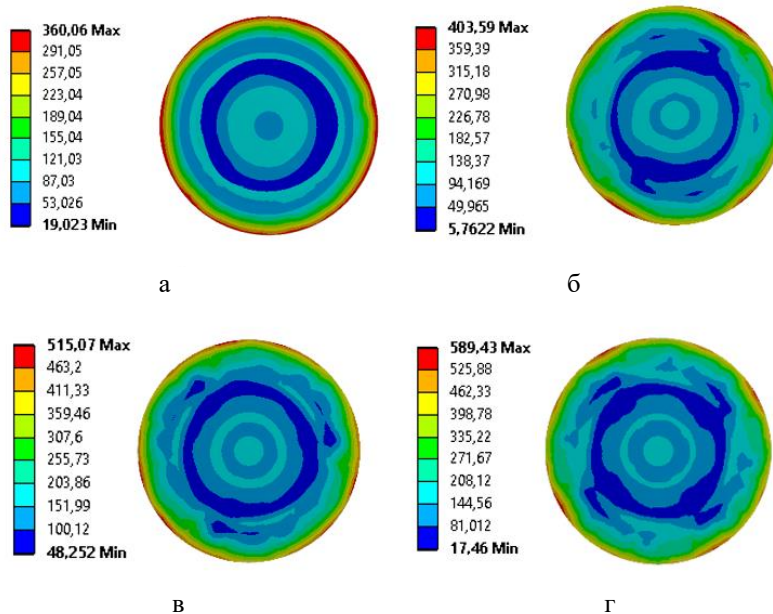


Рис. 11. Распределение интенсивности остаточных напряжений в поперечном сечении детали при разных значениях частоты вращения рабочего инструмента  $n_{инн}$ : а –  $n_{инн} = 100$  об/мин; б –  $n_{инн} = 200$  об/мин; в –  $n_{инн} = 300$  об/мин; г –  $n_{инн} = 400$  об/мин

Fig. 11. Distribution of residual stress intensity for cross-section of the parts at different tool rotation speed  $n_{tool}$ : а is  $n_{tool} = 100$  rev/min; б is  $n_{tool} = 200$  rev/min; в is  $n_{tool} = 300$  rev/min; г is  $n_{tool} = 400$  rev/min

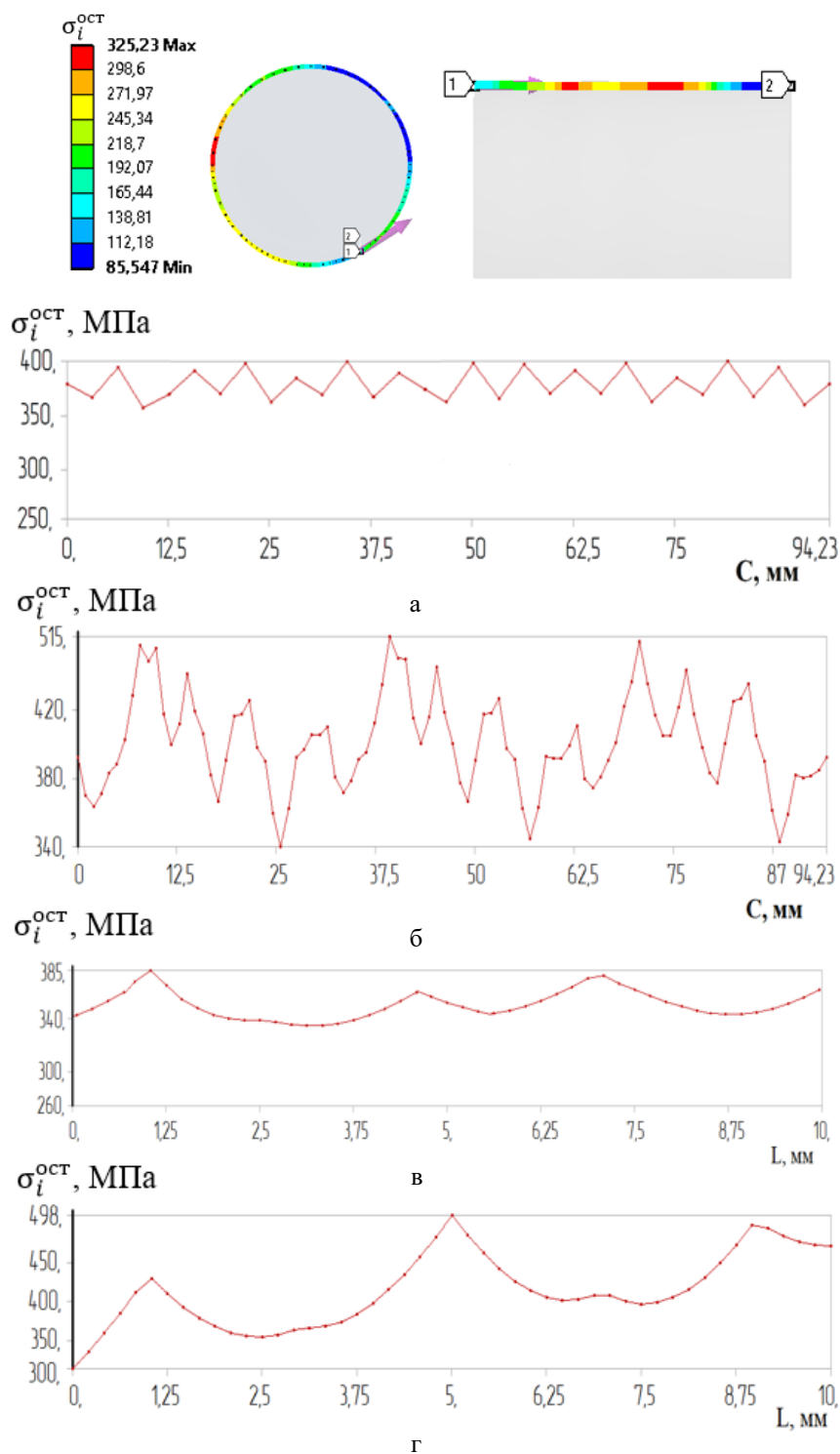


Рис. 12. Распределения интенсивности остаточных напряжений в поверхностном слое по периметру поперечного сечения деталей  $C$  и вдоль оси заготовки  $L$  при частотах вращения инструмента  $n_{\text{ин}} = 100$  мм/об (а, в) и  $n_{\text{ин}} = 300$  мм/об (б, г)

Fig. 12. Distributions of residual stress intensity in the surface layer along the perimeter of the cross-section of parts  $C$  and along the axis of the workpiece  $L$  at tool rotation speed of  $n_{\text{tool}} = 100$  mm/rev (а, в) and  $n_{\text{tool}} = 300$  mm/rev (б, г)

По рис. 12 можно отметить, что при  $n_{ин} = n_{заг} = 100$  мм/об интенсивность максимальных сжимающих остаточных напряжений при этом оказывается меньшей по величине, однако распределяется более равномерно по поверхностному слою. При частоте вращения геликоидного инструмента ( $n_{ин} = 300$  об/мин) наблюдается рост величины этих напряжений, но их распределение становится существенно неравномерным как вдоль оси, так и по периметру поперечного сечения образца. Неравномерное распределение остаточных напряжений по поверхности деталей сказывается как на механических, так и эксплуатационных характеристиках.

**Влияние частоты вращения заготовки.** Зависимость напряженно-деформированного состояния деталей от частоты вращения заготовки представлена на рис. 13 и 14. При этом частота вращения рабочего инструмента составляет 100 мм/об.

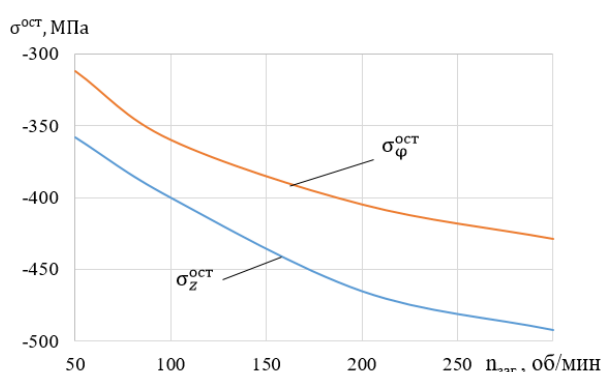


Рис. 13. Влияние частоты заготовки на величину максимальных осевых и тангенциальных сжимающих остаточных напряжений

Fig. 13. The effect of workpiece rotation speed on the magnitude of maximum axial and tangential compressive residual stresses

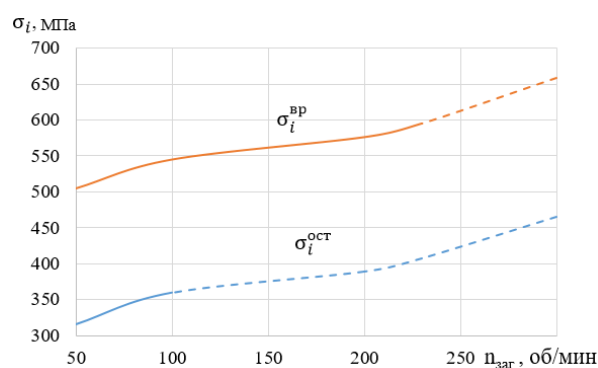


Рис. 14. Влияние частоты вращения заготовки на максимальные значения интенсивности временных и остаточных напряжений

Fig. 14. The effect of the workpiece rotation speed on the maximum values of the intensity of transient and residual stresses

Анализ рис. 13 и 14 показывает, что с увеличением частоты вращения заготовки  $n_{заг}$  в пределах от 50

до 300 об/мин максимальные значения интенсивности временных и остаточных напряжений возрастают на 30 и 47% соответственно. При этом максимальные значения тангенциальных и осевых остаточных напряжений сжатия увеличиваются на 37%. Важно отметить, что при частоте вращения  $n_{заг} > 230$  об/мин интенсивность временных напряжений почти достигает предела прочности материала заготовки ( $\sigma_v = 600$  МПа). Оптимальной частотой вращения как для инструмента, так и для заготовки является 100 об/мин, поскольку при этой частоте остаточные напряжения близки к пределу текучести материала ( $\sigma_T = 360$  МПа).

Глубина пластической деформации является ключевым показателем для оценки физико-механических характеристик и эксплуатационных свойств упрочнённых деталей, обработанных при помощи процесса ППД [20].

Под глубиной пластической деформации понимают область в материале, где величина временных напряжений достигает значения предела текучести. Для количественной оценки глубины упрочнённого слоя использованы результаты численного моделирования (рис. 15), основанные на анализе распределения интенсивности пластических деформаций вдоль радиального направления относительно поверхности цилиндрической заготовки [21].

На рис. 15 представлено распределение пластических деформаций по поперечному сечению образца, а на рис. 15, б – кривая, характеризующая распределение интенсивности пластической деформации, что позволяет точно определить глубину упрочнённого слоя.

Рис. 16 иллюстрирует зависимости максимальных временных радиальных напряжений сжатия  $\sigma_r^{вп}$  и глубины пластической деформации от параметров геликоидного ППД. Следует отметить, что глубина пластической деформации изменяется в пределах от 1,2 до 3,1 мм в зависимости от режимов обработки и основных параметров процесса ППД.

Необходимо отметить, что на рис. 16 представлены закономерности, важные для оптимизации параметров обработки при поверхностном пластическом деформировании. Можно выделить несколько ключевых моментов: при увеличении радиального натяга, частоты вращения геликоидного инструмента и скорости вращения заготовки наблюдается рост глубины пластической деформации. Так, при изменении радиального натяга с 0 до 0,5 мм глубина пластической деформации возрастает на 81%. При увеличении частоты вращения инструмента с 50 до 400 об/мин глубина деформации увеличивается на 77%. Увеличение частоты вращения заготовки с 50 до 300 об/мин приводит к увеличению глубины пластической деформации на 78%. При снижении продольной подачи с 0,4 до 0,05 мм/об глубина пластической деформации возрастает на 76%.

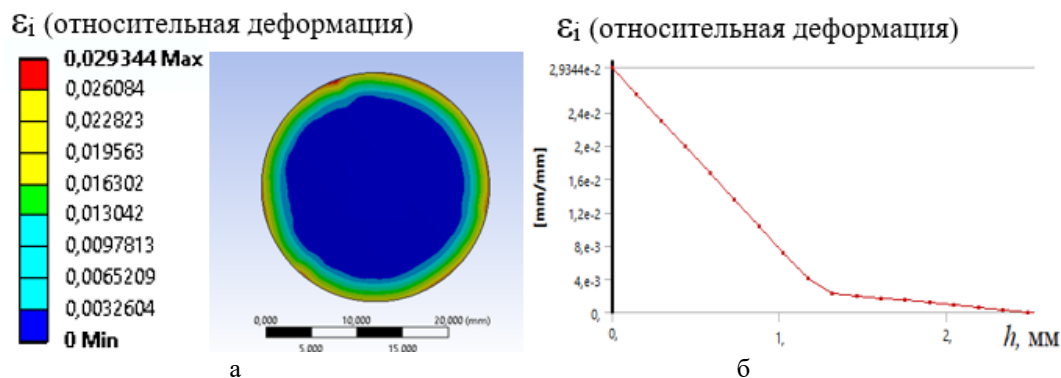


Рис. 15. Распределения интенсивности пластической деформации по поперечному сечению детали (а) и интенсивности пластической деформаций по глубине упрочнённого слоя (б)  
 Fig. 15. Distributions of plastic deformation intensity over the cross-section of the part (a) and along the depth of the hardened layer (б)

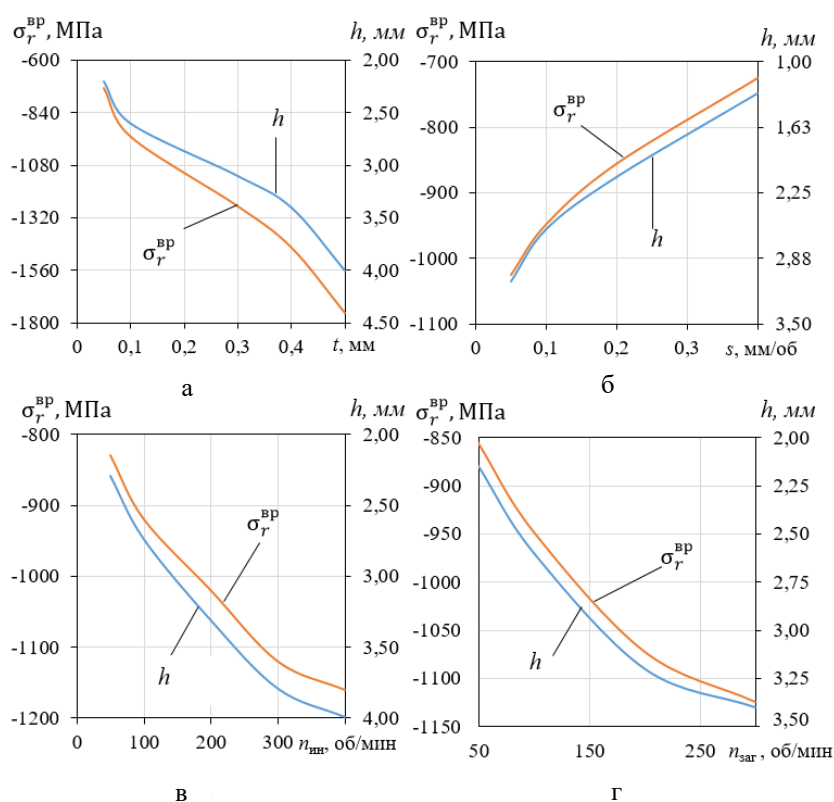


Рис. 16. Влияние основных параметров и режимов обработки на временные радиальные напряжения  $\sigma_r^{BP}$  и глубину пластической деформации  $h$ : а – от радиального натяга; б – от продольной подачи; в – от частоты вращения геликоидного инструмента; г – от частоты вращения заготовки  
 Fig. 16. Influence of key parameters and processing modes on the transient radial stresses  $\sigma_r^{BP}$  and the depth of plastic deformation  $h$ : а is effect of radial interference; б is effect of longitudinal feed rate; в is effect of the rotational speed of the helicoidal tool; г is effect of the rotational speed of the workpiece

**Выводы**

1. Установлены рациональные режимы геликоидного ППД ( $t = 0,1$  мм,  $s = 0,1$  мм/об,  $n_{инн} = n_{заг} = 100$  об/мин), обеспечивающие формирование максимально возможного напряженно-деформированного состояния упрочнённых деталей.

2. В зависимости от режимов геликоидного упрочнения интенсивность временных напряжений можно увеличить в 4 раза, остаточных напряжений – в 4,2 раза, глубину упрочнённого слоя – на 81%.

3. Установлена частота вращения инструмента и заготовки ( $n=100$  об/мин), при которой максимальная

интенсивность временных напряжений не превышает предела прочности, а максимальная интенсивность сжимающих остаточных напряжений – предела текучести материала.

**Список источников**

1. Кокорева О.Г. Оценка напряжённого состояния при упрочнении поверхностно-пластической деформацией // Журнал передовых исследований в области естествознания. 2021. № 12. С. 4-6. DOI: 10.26160/2572-4347-2021-12-4-6.
2. A review on plastic deformation induced surface/interface roughening of sheet metallic materials / Ning Nie., Lihong Su., Guanyu Deng., Huijun Li., Hailiang Yu., Anh Kiet Tieu // Journal of Materials Research and Technology. 2021, vol. 15, pp. 6574-6607. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.087>.
3. Modeling of strengthening mechanisms of surface layers in burnishing process / R. Teimouri, M. Grabowski, R. Bogucki, Ł. Ślusarczyk, S. Skoczypiec // Materials & Design. 2022, vol. 223, 111114. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111114>
4. Зайдес С.А., Ву Куанг Хай. Влияние пространственной ориентации тороидального ролика на напряженно-деформированное состояние цилиндрической заготовки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2024. Т. 20. № 11(239). С. 489-495.
5. A Review on Ball, Roller, Low Plasticity Burnishing Process / Priyadarsini Ch., Venkata Ramana V.S.N., Aruna Prabha K., Swetha S. // Materials Today: Proceedings. 2019, vol. 18, part 7, pp. 5087–5099. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.505>
6. Effect of Roller Burnishing and Slide Roller Burnishing on Surface Integrity of AISI 316 Steel: Theoretical and Experimental Comparative Analysis / Maximov J., Duncheva G., Anchev A., Dunchev V., Anastasov K., Daskalova P. // Machines. 2024, vol. 12, 51. <https://doi.org/10.3390/machines12010051>
7. Deep Rolling Techniques: A Comprehensive Review of Process Parameters and Impacts on the Material Properties of Commercial Steels / Noronha D.J., Sharma S., Prabhu Parkala R., Shankar G., Kumar N., Doddapaneni S. // Metals. 2024, vol. 14, 667. <https://doi.org/10.3390/met14060667>
8. Исследование отделочно-упрочняющей обработки методом обкатывания с программным управлением с помощью тороидального ролика / И.О. Зенин, П.Д. Акулиничев, М.А. Альбов и др. // Технология металлов. 2024. № 4. С. 29-37.
9. Mehrzad Boozarpoor, Reza Teimouri. Parametric study of multi-roller rotary burnishing process // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. 2021, vol. 4, issue 2, pp. 179-194. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.10.001>
10. Varga G., Viktoria Ferencsik. Investigation of the Effect of Surface Burnishing on Stress Condition and Hardening Phenomena // Tehnički vjesnik. 2022, vol. 29, no. 4, pp. 1247-1253. <https://doi.org/10.17559/TV-20211110171854>
11. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Процессы поверхностно-пластического деформирования: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2025. 405 с.
12. Зайдес С. А., Хо М.К. Исследование напряженно-деформированного состояния деталей, упрочнённых пластическим деформированием при циклическом нагружении // Вестник машиностроения. 2022. № 8. С. 28-35.
13. Пат. 2824641 С1 Российская Федерация, МПК В24В 39/04. Способ поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения/ С. А. Зайдес, К. Х. Ву; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет». № 2024106784 ; заявл. 15.03.2024 ; опубл. 12.08.2024.
14. Yadav P.S., Ghatge D.A. Analysis of Optimized Roller Burnishing Parameters Using ANSYS // Advanced Manufacturing and Materials Science. 2018. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-76276-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-76276-0_6)
15. Finite Element Analysis of Bearing Structure Based on ANSYS Workbench // Modeling and Simulation. 2023, vol. 12, no. 06, pp. 5737-5750. DOI: 10.12677/mos.2023.126521.
16. Li J, Xu Y, Liu Y. Influence of Initial Yield Strength Weighting on Residual Stresses in Quenched Cylinders Using Finite Element Analysis // Materials. 2024, vol. 17, no. 23, 5833. <https://doi.org/10.3390/ma17235833>
17. A Concept of Thermal Effort for Heat-Induced Metal Plasticity / Dudda W., Ziolkowski P.J., Ziolkowski P., Bryk M., & Badur J. // Materials. 2024, vol. 17, no. 19, 4824. <https://doi.org/10.3390/ma17194824>
18. Зайдес С.А., Хо М.К. Маятниковое поверхностное пластическое деформирование цилиндрических заготовок // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2022. Т. 65, № 5. С. 344-353.
19. Rotella G, Caruso S, Del Prete A, Filice L. Prediction of Surface Integrity Parameters in Roller Burnishing of Ti6Al4V // Metals. 2020, vol. 10, no. (12), 1671. <https://doi.org/10.3390/met10121671>
20. Особенности формирования глубины упрочнения при обработке деталей поверхностным пластическим деформированием/ Отений Я.Н., Привалов Н.И., Щеголев Н.Г и др. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 12-3. С. 452-455.
21. Отений Я.Н. Влияние параметров деформирующих роликов на геометрию контакта и глубину упрочнения при обработке ППД валов и отверстий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 4(16). С. 8-10.

**References**

1. Kokoreva O.G. Assessment of the stress state during strengthening by surface-plastic deformation. *Zhurnal peredovykh issledovaniy v oblasti estestvoznaniia* [Journal of advanced research in natural sciences]. 2021;(12):4-6. doi: 10.26160/2572-4347-2021-12-4-6. (In Russ.)
2. Ning Nie., Lihong Su., Guanyu Deng., Huijun Li., Hailiang Yu., Anh Kiet Tieu. A review on plastic deformation induced surface/interface roughening of sheet metallic materials. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:6574-6607. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.087>.
3. Teimouri R., Grabowski M., Bogucki R., Ślusarczyk Ł., Skoczypiec S. Modeling of strengthening mecha-

- nisms of surface layers in burnishing process. *Materials & Design*. 2022;223:111114. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111114>
4. Zaydes S.A., Vu Quang Khai. Influence of spatial orientation of a toroidal roller on the stress-strain state of a cylindrical workpiece. *Uprochniiaushchie tekhnologii i pokrytiia* [Strengthening technologies and coatings]. 2024;20(11(239)):489-495. (In Russ.)
  5. Priyadarsini Ch., Venkata Ramana V.S.N., Aruna Prabha K., Swetha S. A review on ball, roller, low plasticity burnishing process. *Materials Today: Proceedings*. 2019;18(7):5087–5099. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.505>.
  6. Maximov J., Duncheva G., Anchev A., Dunchev V., Anastasov K., Daskalova P. Effect of Roller Burnishing and Slide Roller Burnishing on Surface Integrity of AISI 316 Steel: Theoretical and Experimental Comparative Analysis. *Machines*. 2024;12:51. <https://doi.org/10.3390/machines12010051>
  7. Noronha D.J., Sharma S., Prabhu Parkala R., Shankar G., Kumar N., Doddapaneni S. Deep Rolling Techniques: A Comprehensive Review of Process Parameters and Impacts on the Material Properties of Commercial Steels. *Metals*. 2024;14:667. <https://doi.org/10.3390/met14060667>
  8. Zenin I.O., Akulinichev P.D., Albov M.A. et al. Study of finishing and hardening treatment by the method of rolling with software control using a toroidal roller. *Tekhnologiya metallov* [Technology of metals]. 2024;(4):29-37. (In Russ.)
  9. Mehrzad Boozarpoor, Reza Teimouri. Parametric study of multi-roller rotary burnishing process. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2021;4(2):179-194. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.10.001>
  10. Varga G., Viktoria Ferencsik. Investigation of the Effect of Surface Burnishing on Stress Condition and Hardening Phenomena. *Tehnički vjesnik*. 2022;29(4):1247-1253. <https://doi.org/10.17559/TV-20211110171854>
  11. Zaydes S.A., Nguyen Huu Hai. *Protsessy poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniia: monografiya* [Processes of surface plastic deformation: monograph]. Irkutsk: Publishing house of Irkutsk National Research Technical University, 2025, 405 p. (In Russ.)
  12. Zaydes S.A., Ho M.K. Study of the stress-strain state of parts strengthened by plastic deformation under cyclic loading. *Vestnik mashinostroeniia* [Bulletin of mechanical engineering]. 2022;(8):28-35. (In Russ.)
  13. Zaydes S.A., Vu K.H. *Sposob poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniia naruzhnykh poverkhnostei tel vrashcheniia* [Method of surface plastic deformation of external surfaces of bodies of revolution]. Patent RU, no. 2824641, 2024.
  14. Yadav P.S., Ghatge D.A. (2018). Analysis of Optimized Roller Burnishing Parameters Using ANSYS. *Advanced Manufacturing and Materials Science*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-76276-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-76276-0_6)
  15. Finite Element Analysis of Bearing Structure Based on ANSYS Workbench. *Modeling and Simulation*. 2023;12(06):5737-5750. DOI 10.12677/mos.2023.126521.
  16. Li J, Xu Y, Liu Y. Influence of Initial Yield Strength Weighting on Residual Stresses in Quenched Cylinders Using Finite Element Analysis. *Materials*. 2024;17(23):5833. <https://doi.org/10.3390/ma17235833>
  17. Dudda W., Ziólkowski P.J., Ziólkowski P., Bryk M., Badur J. A Concept of Thermal Effort for Heat-Induced Metal Plasticity. *Materials*. 2024;17(19):4824. <https://doi.org/10.3390/ma17194824>
  18. Zaydes S.A., Ho M.K. Pendulum surface plastic deformation of cylindrical blanks. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaia metallurgiiia* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 2022;65(5):344-353. (In Russ.)
  19. Rotella G, Caruso S, Del Prete A, Filice L. Prediction of Surface Integrity Parameters in Roller Burnishing of Ti6Al4V. *Metals*. 2020;10(12):1671. <https://doi.org/10.3390/met10121671>
  20. Oteniy Ya.N., Privalov N.I., Shchegolev N.G. et al. Features of the formation of the depth of hardening during the processing of parts by surface plastic deformation. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovanii* [International Journal of Applied and Fundamental Research]. 2016;(12-3):452-455. (In Russ.)
  21. Oteniy Ya.N. Influence of deforming roller parameters on contact geometry and hardening depth during SPD machining of shafts and holes. *Uprochniiaushchie tekhnologii i pokrytiia* [Hardening technologies and coatings]. 2006;(4(16)):8-10. (In Russ.)

Поступила 09.10.2025; принята к публикации 21.02.2026; опубликована 31.03.2026  
Submitted 09/10/2025; revised 21/02/2026; published 31/03/2026

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

**Ву Куанг Хай** – аспирант,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.  
Email: vuquangkhai98hp@gmail.com. ORCID 0009-0000-2938-8369

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

**Vu Quang Khai** – Postgraduate Student,  
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.  
Email: vuquangkhai98hp@gmail.com. ORCID 0009-0000-2938-8369