

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №6 (132). С. 12-21.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №6 (132). P. 12-21.

Научная статья

УДК 621.787.4

doi: 10.30987/2223-4608-2022-6-12-21

## **Влияние кинематики тороидального инструмента на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя деталей машин**

<sup>1</sup>Семен Азикович Зайдес, д.т.н.,

<sup>2</sup>Нгуен Хью Хай, аспирант

<sup>1, 2</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет г. Иркутск, Россия

<sup>1</sup> zsa@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0001-9416-7749>

<sup>2</sup> nquan6799@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7909-385X>

**Аннотация.** Рассмотрен подход к увеличению напряженного состояния в очаге упруго-пластической деформации при поверхностном пластическом деформировании. Техническая идея решения задачи основана на рассмотрении кинематики рабочего инструмента. Предложен новый процесс упрочнения, основанный на круговой осцилляции рабочего инструмента. Для доказательства эффективности новой кинематики рабочего инструмента использовано конечно-элементное моделирование, которое позволило определить напряженно-деформированное состояние в очаге деформации. Установлено, что осциллирующее вращение рабочего ролика значительно эффективнее по сравнению со статическим скольжением как по напряженному, так и по деформированному состоянию упрочненного слоя.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, двухрадиусный ролик, глубина пластической деформации, временные напряжения

**Для цитирования:** Зайдес С.А., Нгуен Х.Х. Влияние кинематики тороидального инструмента на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя деталей машин // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №6 (132). – С. 12-21. doi: 10.30987/2223-4608-2022-6-12-21

Original article

## **Influence of the kinematics of a toroidal tool on the stress-strain state of the surface layer of machine parts**

<sup>1</sup>Semen Azikovitch Zaides, Dr.Sc.Tech,

<sup>2</sup>Nguyen Huu Hai, postgraduate student

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

<sup>1</sup>zsa@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0001-9416-7749>

<sup>2</sup>nquan6799@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7909-385X>

**Annotation.** An approach to taut state increasing within elastic-plastic deformation zone in the process of surface plastic deformation has been viewed. The technical idea of solving the problem is based on the study of workplace tool kinematics. A new hard-ening process based on the workplace tool circular oscillation is proposed. To prove the effectiveness of the new workplace tool kinematics, finite element modeling has been, which helped to determine an elastic state in the deformation zone. It is found that the oscillate rotation of the work roll is much more efficient comparing to static sliding both in the taut state and distorted condition of the hardened layer.

**Keywords:** elastic state, two-radius roller, plastic deformation intensity, temporary stresses

**For citation:** Zaides S.A., Nguyen H.H. Influence of the kinematics of a toroidal tool on the stress-strain state of the surface layer of machine parts. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.6 (132), pp. 12-21. doi: 10.30987/2223-4608-2022-6-12-21

## Введение

Механическая обработка резанием позволяет изготавливать детали достаточно точными по форме и размерам. Такие детали обычно удовлетворяют требованиям операции сборки, но для эффективной эксплуатации изделий необходимо обеспечить длительную и стабильную работу узлов и конструкции в целом. Работоспособность деталей машин во многом зависит от качества поверхностного слоя, который в первую очередь воспринимает силовые, температурные, атмосферные и другие виды воздействий [1, 2].

Для повышения качества поверхностного слоя деталей машин достаточно широко применяют отделочно-упрочняющую обработку поверхностным пластическим деформированием (ППД), которая позволяет снизить шероховатость, повысить твердость и сформировать сжимающие остаточные напряжения в поверхностных слоях деталей машин [3, 4].

Процессы ППД основаны на силовом воздействии рабочего инструмента в виде шарика, ролика, алмазного индентора и др. на поверхность детали. Малые пластические деформации создают наклеп поверхностного слоя, что приводит к повышению механических свойств материала [5].

В металлообрабатывающих отраслях промышленности сформировалась определенная группа нетехнологичных нежестких деталей, к которым относятся валы, оси, штанги и др. Даже при механической обработке резанием таких деталей возникают проблемы, связанные с получением заданной формы. При ППД обеспечение стабильного качества по длине обработки вызывает еще более повышенные трудности. Проблема заключается в том, что для обеспечения необходимого качества поверхностного слоя требуется приложить к рабочему инструменту силу, которая направлена обычно перпендикулярно к поверхности детали. Эта сила совместно с центробежными силами, возникающими при вращении заготовки, вызывают ее искривление, что не позволяет получить стабильные механические свойства по длине заготовки. Для снижения искривления заготовки можно снизить частоту ее вращения или уменьшить радиальный натяг инструмента, но при этом снижается производительность обработки, а также невозможно получить заданные характеристики

качества поверхностного слоя, например, степень упрочнения и величину шероховатости поверхности.

В этой связи возникает задача по интенсификации напряженного состояния в очаге упруго-пластической деформации процесса ППД без увеличения радиального натяга. Поиск способа повышения интенсивности напряжений в очаге деформации является актуальной задачей, которая позволит решить ряд проблем при упрочнении деталей малой жесткости.

Один из путей повышения прочностных характеристик сталей сплавов заключается в разработке упрочняющих технологий, обеспечивающих формирование такого структурного состояния материала, при котором максимально реализуются основные принципы дислокационной теории упрочнения [6]. Для решения поставленной задачи, в ИРНТУ предложено рассмотреть кинематику технологического процесса [7 – 12]. Было установлено, что при более сложной кинематике рабочего инструмента, при прочих равных условиях, удастся повысить напряженное состояние в очаге деформации и остаточные напряжения в готовых деталях.

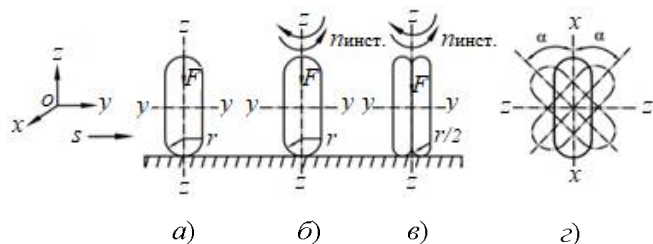
Авторами данной статьи разработан новый способ упрочнения, основанный на осциллирующем вращении рабочего инструмента [13]. В статье приводятся исследования эффективности нового способа упрочнения по сравнению с известным способом обработки тороидальным роликом.

Целью данной работы является определение и исследование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при разных кинематиках рабочего инструмента для оценки эффективности нового процесса ППД.

### Кинематические схемы поверхностного пластического деформирования

Рассмотрим несколько схем локального нагружения роликов на плоскую поверхность детали.

Схема на рис. 1, а характеризует статическое локальное нагружение жестким роликом. Схемы на рис. 1, б и в представляют собой новый процесс упрочнения, основанный на осциллирующем вращении рабочего инструмента относительно вертикальной оси с амплитудой угла  $\alpha$  ( $-180^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ ).



**Рис. 1. Кинематические схемы нагружения поверхности образца жестким роликом при разных условиях контакта с обрабатываемой поверхностью:**

*a* – ролик без вращения; *b* – однорадиусный ролик с осциллирующим вращением относительно  $z - z$ ; *в* – двухрадиусный ролик с осциллирующим вращением относительно  $z - z$ ; *г* – схема кругового осциллирующего вращения с углом  $\alpha$

Разница между схемами *b* и *в* заключается в том, что в схеме *b* деформирующий элемент представляет собой жесткий ролик с профильным радиусом  $r$ , а в схеме *в* – двухрадиусный ролик с профильным радиусом  $r/2$ . Схема на рис. 1, *г* представляет собой круговое осциллирующее вращение с углом  $\alpha$ .

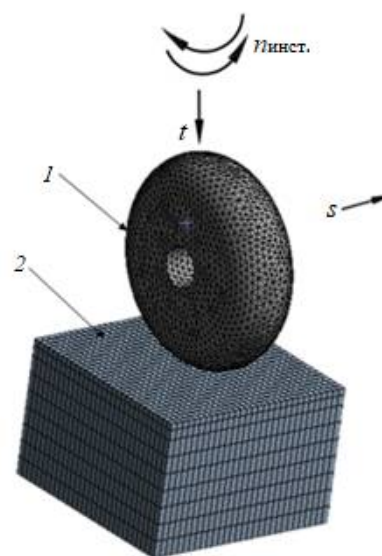
Новая кинематика деформирующего инструмента со специальной формой деформирующего элемента, выполненного в виде двухрадиусного ролика, с точки зрения механики процесса и возможности деформационного искажения микроструктуры, должна способствовать «перемешиванию» структуры материала в поверхностном слое и повышать эффективность упрочнения обрабатываемой поверхности деталей за счет усиления дислокационных процессов.

### Компьютерное моделирование процессов нагружения

Для анализа напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при обработке ППД широко используют метод конечных элементов. Одной из универсальных и широко применяемых программ, основанных на использовании метода конечных элементов, является ANSYS [14 – 16], которая и была использована в данной работе. Программный комплекс ANSYS предназначен для численного решения задач механики деформируемых тел и ряда других задач. Моделирование процесса обкатки роликами в программе ANSYS дает возможность определить все необходимые характеристики процесса: временные и остаточные напряжения,

упругие и пластические деформации, глубину упрочненного слоя и т.д., что позволяет оценить и выбрать технологический процесс ППД и обосновать необходимую геометрию рабочего инструмента.

Деформирующий ролик совершает осциллирующее вращение с частотой  $n_{инстр.}$  относительно вертикальной оси  $z$  (см. рис. 1, 2) и перемещается в осевом направлении по направлению продольной подачи  $s$ , а также внедряется в обрабатываемую поверхность с натягом  $t$  (рис. 2).



**Рис. 2. Конечно-элементная модель при нагружении образца жестким роликом:**

1 – жесткий деформирующий ролик; 2 – модель (образец) при наличии сил поверхностного натяжения

Для проведения расчетов по определению НДС процессов нагружения приняты следующие условия и режимы обработки: тип индентора – ролик диаметром  $D = 30$  мм с приведенным радиусом  $r = 5$  мм; материал – твердый сплав ВК8; модуль упругости  $E = 6 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ ; натяг  $t = 0,1$  мм; частота круговой осцилляции роликов  $n = 300$  дв. ход/мин<sup>-1</sup>; коэффициент трения в зоне контакта рабочего инструмента с образцом  $f = 0,1$ ; амплитуда угла осцилляции  $\alpha = \pm 30^\circ$ ; скорость продольного перемещения роликов равная величине подачи  $s = 0,2$  мм/с.

Характеристики заготовки: в качестве модели заготовки был использован образец с размерами 30x30x30 мм; материал – сталь 45 – упругопластический, упрочняющийся; модуль упругости  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ ; диаграмма деформирования

материала – билинейная (предел текучести  $\sigma_T = 360$  МПа; модуль упругости  $E_T = 1,45 \cdot 10^3$  МПа).

Для оценки обобщенного напряженного сос-

тояния в разных точках тела с учетом временных напряжений, действующих по осям  $Oz$ ,  $Ox$ ,  $Oy$ , определена интенсивность напряжений по Мизесу (von – Mises)  $\sigma_i^{ост}$  [17 – 19]:

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

где  $\sigma_x^{BP}$ ,  $\sigma_y^{BP}$ ,  $\sigma_z^{BP}$  – компоненты временных напряжений, действующий по осям  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$ .

### Результаты компьютерного моделирования

Напряженно-деформированное состояние в очаге упруго-пластической деформации оценивали по величине временных напряжений ( $\sigma^{BP}$ ,  $\tau^{BP}$ ), которые возникают при действии внешних сил. Временные напряжения оказывают влияние на энергосиловые характеристики процесса и глубину упрочненного слоя, давление в зоне деформации, а также на прочность и износостойкость деформирующего инструмента [20, 21].

**Временные напряжения.** На рис. 3 приведены для примера поля распределения интенсивности временных напряжений  $\sigma_i^{BP}$  в очаге деформации при разных схемах нагружения.

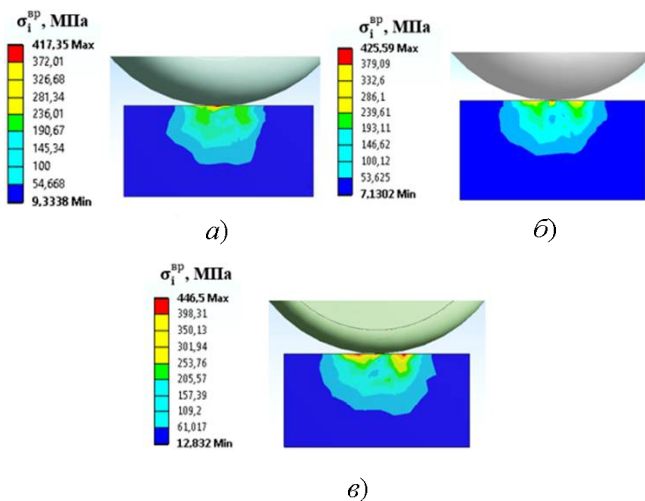


Рис. 3. Распределение полей интенсивности временных напряжений  $\sigma_i^{BP}$  в очаге деформации образца при разных схемах нагружения (см. рис. 1)

Анализ распределения полей интенсивности временных напряжений показывает, что при круговой осцилляции двухрадиусного ролика (см. рис. 1, в) в зоне контакта с обрабатываемой поверхностью возникает наибольшая, а при статическом ско-

льжении ролика (см. рис. 1, а) – наименьшая интенсивность максимальных временных напряжений. Геометрический размер упруго-пластических полей позволяет также качественно оценить уровень напряженного состояния в очаге деформации.

По рис. 3 видно, что осциллирующее вращение двухрадиусного ролика вызывает деформационные процессы и в направлении подачи и в глубину слоя существенно больше, чем ролик со статическим скольжением. Установлено, что интенсивность временных напряжений возрастает при более сложной кинематике деформирующего инструмента с двухрадиусной формой профиля рабочей поверхности.

Зависимость интенсивности максимальных временных напряжений от разных схем нагружения представлена на рис. 4.

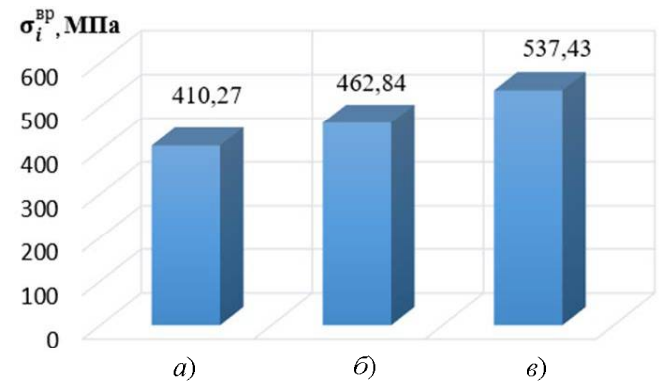


Рис. 4. Зависимость интенсивности максимальных временных напряжений  $\sigma_i^{BP}$  от схемы нагружения рабочего инструмента (см. рис. 1)

Из рис. 4, можно предполагать, что при схеме статического скольжения (см. рис. 1, а) происходит минимальное искажение структуры зерен материала. При нагружении ролика по схеме в (осциллирующее вращение однорадиусного ролика с амплитудой угла  $\alpha$  относительно оси  $z-z$ ) возникает большее трение в зоне контакта, при котором усиливается искажение структуры материала поверхностного слоя.

Деформационные процессы дополнительно усиливаются за счет изменения положений

очага деформации относительно оси  $x-x$ . Это объясняется тем, что пластические отпечатки от рабочего инструмента на поверхности детали, представляющие собой фигуру в виде эллипса, постоянно, циклически изменяют ориентацию большой и малой оси. При осциллирующем вращении ролика относительно оси  $z-z$  происходит искажение кристаллической структуры материала за счет сдвига зерен в разных направлениях, что способствует росту дислокаций и повышению прочности поверхностного слоя.

Наиболее эффективный результат получен при использовании упрочнения по схеме в с осциллирующем вращении двухрадиусного ролика относительно оси  $z-z$  (см. рис. 1, в). Это объясняется тем, что в процессе обработки первый деформирующий ролик полностью работает в зоне очага деформации, создаваемого вторым деформирующим роликом. При осциллирующем вращении роль деформирующих роликов меняется, происходит усиленный сдвиг кристаллов в разных направлениях, что способствует росту дислокаций, искажению структуры, приводящие к повышению механических характеристик металла в поверхностном слое образца.

Из рис. 4 также можно сделать вывод, что продольное перемещение деформирующего инструмента с двухрадиусной формой профиля рабочей поверхности значительно влияет на изменение величины интенсивности максимальных временных напряжений. В работе установлено, что при осциллирующем вращении двухрадиусного ролика, значение временных напряжений более чем на 30 % больше по сравнению со значением временных напряжений при статическом скольжении ролика.

Формирование напряженного состояния в очаге упруго-пластической деформации аналогично закономерности, имеющей место при испытании образцов на растяжение. Изменение временных напряжений  $\sigma_i^{вп}$  с течением времени при разных схемах нагружения деформирующих роликов представлено на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что при осциллирующем вращении роликов кривая пластического деформирования имеет более сложный характер, чем при упрочнении без вращения рабочего инструмента. Осциллирующее вращение двухрадиусного ролика (см. рис. 1, в) характеризуется более сильной интенсивностью

напряжений и более пульсирующей кривой. Это объясняется тем, что при осциллирующем движении двухрадиусного ролика с продольным перемещением за счет дополнительных сил трения скольжения происходит более сложные деформационные процессы в поверхностных слоях.

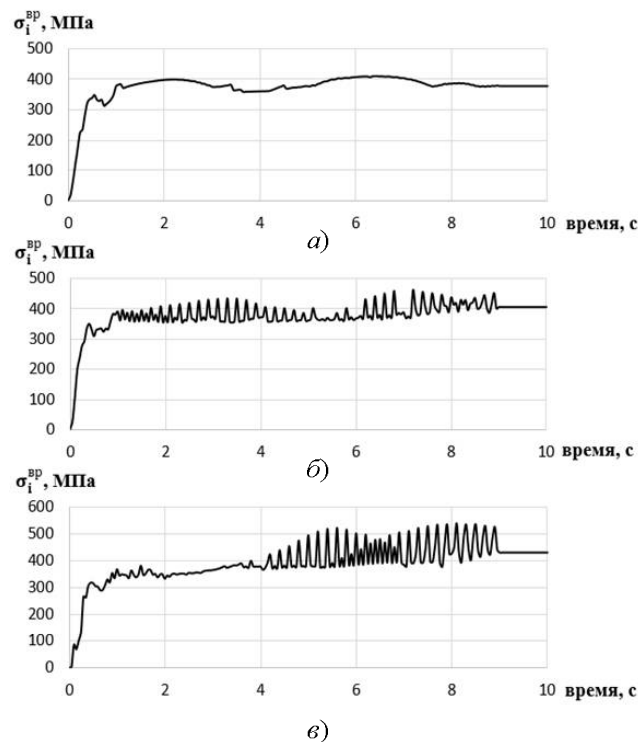


Рис. 5. Изменение во времени интенсивности временных напряжений при разных схемах нагружения (см. рис. 1)

Полученные значения компонентов максимальных временных напряжений при разных схемах деформирования представлены в табл. 1, из которой следует, что с усложнением кинематики рабочего инструмента возрастают все компоненты тензора временных напряжений.

**1. Значения компонентов максимальных временных напряжений при разных схемах нагружения деформирующего инструмента**

Схема нагружения	$\sigma_y^{вп}$ , МПа	$\sigma_x^{вп}$ , МПа	$\sigma_z^{вп}$ , МПа
<i>a</i>	-1062,7	-1156,8	-1459,7
<i>б</i>	-1167,9	-1198,5	-1561,7
<i>в</i>	-1408,6	-1445,3	-1795,2

Также следует отметить, что в направлении профильного радиуса ролика (ось  $X$ ) все компоненты временных напряжений выше по сравнению с направлением оси  $Y$  (радиус ролика).

ка  $D/2$ ). Этот результат можно объяснить, если рассмотреть схему нагружения в виде клина, который геометрически может быть образован касательными линиями к окружности ролика, соединенными на глубине натяга.

На рис. 6 показано распределение временных нормальных напряжений  $\sigma_y^{BP}$  и касательных компонент  $\tau_{xz}^{BP}$  в очаге деформации при разных схемах нагружения.

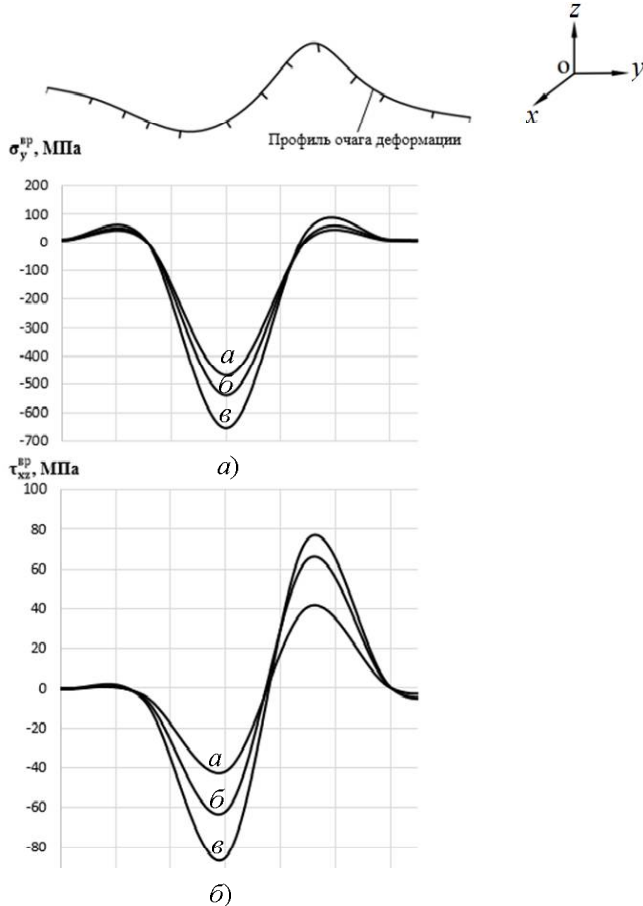


Рис. 6. Распределение временных нормальных  $\sigma_y^{BP}$  и касательных  $\tau_{xz}^{BP}$  напряжений в очаге деформации при разных схемах нагружения (см. рис. 1)

При этом плоскость моделированного образца определяется осью  $y$ , которая совпадает с направлением продольного перемещения  $s$ , и осью  $z$ , которая проходит через точку касания деформирующего элемента и обрабатываемой детали и перпендикулярно к поверхности контакта.

Из рис. 6 следует, что максимальное абсолютное значение компонент временных нормальных и касательных напряжений имеет схема  $v$  – при осциллирующем вращении двухрадиусного ролика, минимальное – схема  $a$  – при статическом скольжении ролика. При всех схемах упрочнения напряжения  $\sigma_y^{BP}$  и  $\tau_{xz}^{BP}$  по абсолютному значению максимальны не под вершиной рабочего инструмента, а

несколько впереди по направлению продольного перемещения.

Значения временных нормальных напряжений  $\sigma_y^{BP}$  при осциллирующем вращении двухрадиусного ролика в 1,41 раз выше по сравнению со значением временных нормальных напряжений при статическом скольжении ролика, а касательных напряжений  $\tau_{xz}^{BP}$  при таком же сравнении выше в 2 раза.

Следует отметить, что касательные напряжения в несколько раз меньше нормальных напряжений, что согласуется с известными теоретическими и экспериментальными результатами [4]. По этой причине их обычно не рассматривают при оценке напряженного состояния. Однако касательные напряжения являются инициаторами сдвиговых процессов при изменении структуры материала. Результаты моделирования убедительно доказали, что при осциллирующем вращении двухрадиусного ролика возникают наибольшие значения касательных напряжений.

На рис. 7 представлено распределение компонент временных напряжений  $\sigma_z^{BP}$  по глубине поверхностного слоя (см. рис. 1).

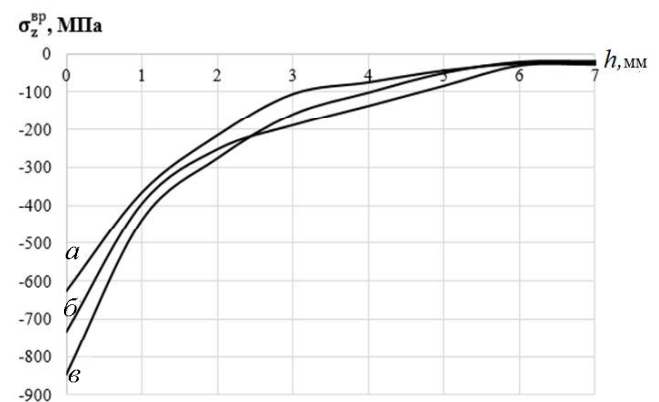


Рис. 7. Распределение компонент тензора временных напряжений  $\sigma_z^{BP}$  по глубине поверхностного слоя при разных схемах нагружения (см. рис. 1)

Из рис. 7 следует, что при всех схемах упрочнения в поверхностных слоях образцов возникают сжимающие временные напряжения  $\sigma_z^{BP}$  и при осциллирующем вращении двухрадиусного ролика достигают наибольшего максимального значения, которое в 1,35 раза выше по сравнению со значением максимального временного напряжения  $\sigma_z^{BP}$  при статическом скольжении ролика.

**Деформация поверхностного слоя.** При нагружении поверхностного слоя жестким роликом формируется пластический слой, кото-

рый изменяет строение и физико-механические свойства металла, повышаются прочностные свойства, снижается пластичность, коррозионная стойкость и т.д. [21, 22].

На рис. 8 показано распределение максимальной интенсивности деформаций в очаге нагружения при разных схемах движения роликов (см. рис. 1).

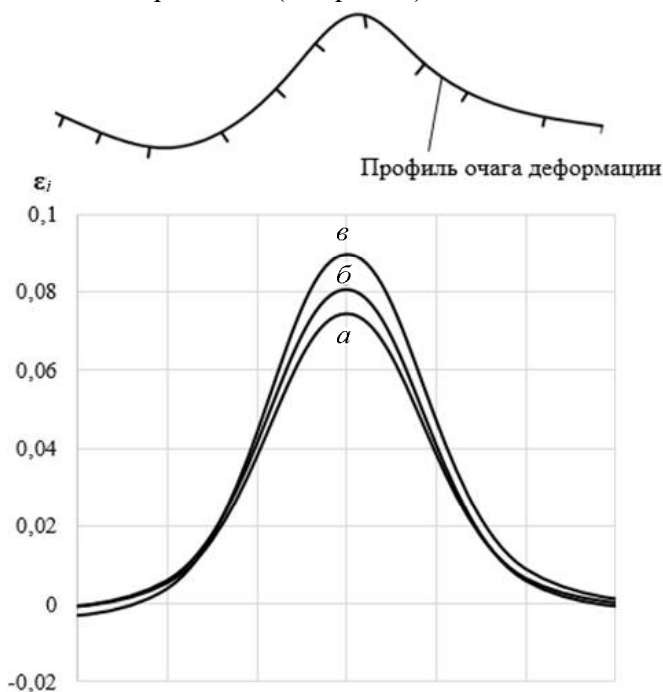


Рис. 8. Распределение максимальной интенсивности деформаций в очаге нагружения при разных схемах движения роликов (см. рис. 1)

Из рис. 8 следует, что при всех схемах нагружения (см. рис. 1) максимальная интенсивность деформации возникает в зоне вершины волны. При осциллирующем вращении двухрадиусного ролика имеем наибольшую величину, а наименьшую – при статическом скольжении ролика. При осциллирующем вращении двухрадиусного ролика максимальная интенсивность деформации выше в 1,33 раза по сравнению со значением максимальной интенсивности деформации при статическом скольжении ролика.

**Глубина пластической деформации.** При обработке металлов давлением создаются различные пластические зоны как по форме, так и по размерам, которые оказывают существенное влияние как на степень упрочнения, так и на разрушение металлических материалов и на сопротивление развитию трещин. Глубина пластической де-

формации является важным параметром при оценке физико-механических и эксплуатационных свойств упрочненных деталей ППД [23, 24]. На рис. 9 и 10 показаны результаты определения зоны пластической деформации после нагружения двухрадиусным роликом (см. рис. 1, в).

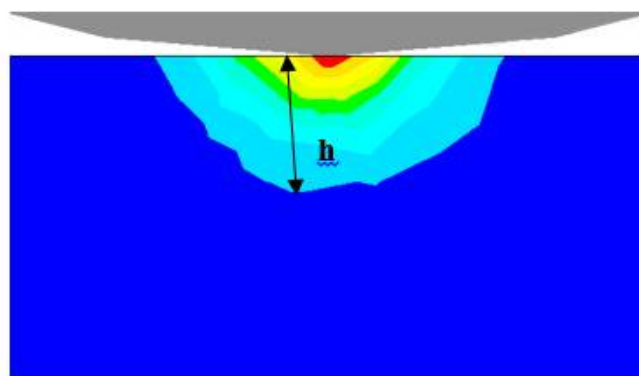


Рис. 9. Поля распределения пластической деформации по глубине поверхностного слоя после упрочнения двухрадиусным роликом (см. рис. 1, в)

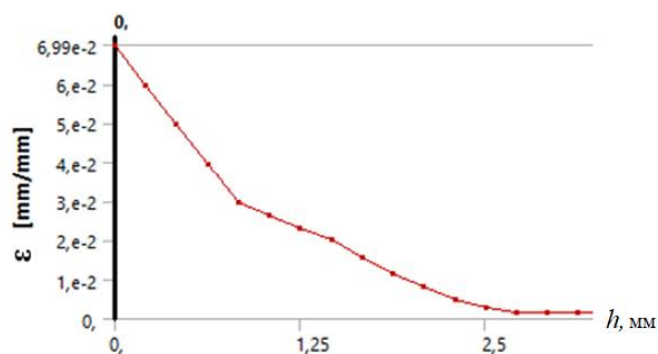


Рис. 10. График распределения пластической деформации после упрочнения двухрадиусным роликом (см. рис. 1, в)

Из рис. 10 видно, что при осциллирующем вращении двухрадиусного ролика максимальная величина пластической деформации при упрочнении достигает своего значения в центральной зоне контакта и убывает в направлении толщины поверхностного слоя. В зоне толщиной  $h > 2,5$  мм величина пластической деформации близка к нулю. Таким образом, зона пластической деформации при нагружении двухрадиусным роликом находится в интервале  $0 \leq h < 2,5$  мм. В табл. 2 приведены значения глубины пластической деформации в зависимости от схемы обработки.

При осциллирующем вращении двухрадиусного ролика достигается наибольшая глубина пластической деформации, которая на 40 % выше, чем значение глубины пластической

деформации при статическом скольжении ролика.

## 2. Влияние кинематики нагружения роликов на глубину пластической деформации

Схемы нагружения (см. рис. 1)	Глубина пластической деформации $h$ (мм)
<i>a</i>	1,8
<i>б</i>	2,1
<i>в</i>	2,5

Полученные результаты исследования доказывают эффективность нового способа поверхностного пластического деформирования на основе осциллирующего вращения двухрадиусного ролика. С использованием конечно-элементного моделирования установлено, что предлагаемая геометрия и кинематика движения ролика существенно влияют на напряженное состояние в очаге деформации и глубину пластической деформации в упрочненном слое.

## Выводы

1. На основе метода конечных элементов и компьютерной программы ANSYS разработана конечно-элементная модель процесса упрочнения для разных кинематических движений рабочего инструмента. Это позволило установить влияние кинематики рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние в очаге деформации в упрочненном слое. Результаты моделирования и численных расчетов показали эффективность нового способа отделочно-упрочняющей обработки – осциллирующего поверхностного пластического деформирования.

2. При одинаковых условиях упрочнения значение интенсивности временных напряжений возрастает по следующей очередности: статическое скольжение ролика; осциллирующее вращение однорадиусного ролика; осциллирующее вращение двухрадиусного ролика. При этом упрочнение двухрадиусным роликом приводит к повышению значений временных напряжений более чем на 30 % по сравнению со значением временных напряжений при статическом скольжении ролика. Величина временного напряжения в направлении подачи при упрочнении двухрадиусным роликом в 1,41 раз выше по сравнению со значением временного напряжения при скольжении роли-

ка, а касательная компонента  $\tau_{yz}^{BP}$  выше в 2 раза. При осциллирующем вращении двухрадиусного ролика формируется наибольшее максимальное временное напряжение  $\sigma_z^{BP}$ , которое в 1,35 раза выше по сравнению со значением максимального временного напряжения  $\sigma_z^{BP}$  при статическом скольжении ролика.

3. При всех схемах упрочнения максимальная интенсивность деформаций возникают в зоне вершины волны, и при осциллирующем вращении двухрадиусного ролика имеет наибольшее значение, а наименьшая – при статическом скольжении ролика. При осциллирующем вращении двухрадиусного ролика максимальная интенсивность деформации выше в 1,33 раза по сравнению со значением максимальной интенсивности деформации при статическом скольжении ролика. Глубина пластической деформации увеличивается по очередности, описанной для напряжений. При осциллирующем вращении двухрадиусного ролика достигается наибольшая глубина пластической деформации, которая на 40 % выше по сравнению со значением глубины пластической деформации при статическом скольжении ролика.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Одинцов, Л.Г.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
2. **Алексеев, П.Г.** Повышение износостойкости стальных деталей путем поверхностного упрочнения // Станки и инструмент. – 1968. – № 1. – С. 7-9.
3. **Бабичев, А.П., Мотренко, П.Д.** Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2003. – 192 с.
4. **Смелянский, В.М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
5. **Попова, В.В.** Поверхностное пластическое деформирование и физикохимическая обработка. Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2013. – 98 с.
6. **Приходько, В.М., Петрова, Л.Г., Чудина, О.В.** Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий. – М.: Машиностроение, 2003. – 384 с.
7. **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.
8. **Зайдес, С.А., Нго Као Кыонг** Влияние кинематики процессов поверхностного пластического деформирования на качество упрочненного слоя // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – №5 (149). – С. 235-240.



REFERENCES

9. Зайдес, С.А., Бобровский, И.Н., Фам Ван Ан. Влияние кинематики локального деформирования на напряженное состояние поверхностного слоя // Научные технологии в машиностроении. – 2019. – №5 (95). – С. 32-38.
10. Зайдес, С.А., Фам Ван Ан. Влияние кинематики деформирующего инструмента на напряженное состояние поверхностного слоя при упрочнении цилиндрических деталей // Вестник машиностроения. – 2021. – № 4.
11. Зайдес, С.А., Фам Ван Ан. Влияние кинематики рабочего инструмента при локальном нагружении на напряженное состояние поверхностного слоя // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – Т. 15. – №11 (179).
12. Зайдес, С.А. От кинематики рабочего инструмента к новым процессам отделочно-упрочняющей обработки // Вестник ИРГТУ. – 2019. – №23 (5).
13. Патент: Способ поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения / RU № 2758713, МПК В24В 39/04, опубликовано 01.11.2021.
14. Chen, X., Liu, Y. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. CRC Press, 2014, 411 p.
15. Бруйка, В.А., Фокин, В.Г., Кураева, Я.В. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 109 с.
16. Бакон, К.А. ANSYS. Справочник пользователя, М.: ДМК Пресс, 2005. – 650 с.
17. Stress Triaxiality and Lode Angle Parameter Characterization of Flat Metal Specimen with Inclined Notch / Jian Peng, Peishuang Zhou, Ying Wang et. al. // Metals. – 2021, Vol. 11.
18. Effect of Yield Strength Distribution Welded Joint on Crack Propagation Path and Crack Mechanical Tip Field / Yueqi Bi, Xiaoming Yuan, Jishuang Lv et. al. // Materials. – 2021, Vol. 14.
19. Вишняков, Я.Д., Пискарев, В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. – М: Металлургия, 1989. – 253 с.
20. Белов, В.А. Влияние поверхностного упрочнения плоскостей на их стыковую жесткость // Вестник машиностроения. – 1964. – № 3. – С. 46-49.
21. Бубнов, А.С., Зайдес, С.А. Напряженное состояние при правке стесненным сжатием стержневых изделий / под ред. Г.С. Гуна // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвузовский международный сб. науч. трудов. – Магнитогорск: МГТУ, 2003. – С. 18- 22.
22. Xu, Y., 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.
23. Букатый, С.А. Деформации лопаток турбомашин после обработки поверхности // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: межвузовский сб. КуАИ. – Куйбышев, 1976. – Вып. 4. – С. 72-79.
24. Способ определения толщины упрочненного наклепом поверхностного слоя: пат. 2194263 РФ, МПК 7 G 01 № 3/00 / М.М. Матлин, С.Л. Лебский, А.И. Фролова. ВолГТУ. – 2002.
25. Способ определения относительной степени упругопластической деформации материала: пат. 2386116 РФ, МПК G 01 № 3/28. / М.М. Матлин, С.Л. Лебский, А.И. Мозгунова, А.И. Фролова. – ВолГТУ. – 2010.
1. Odintsov L.G. Strengthening and finishing of parts by surface plastic deformation. M.: Mashinostroenie, 1987. 328 p.
2. Alekseev P.G. Improving the wear resistance of steel parts by surface hardening // Machine tools and tools. - 1968. - No. 1. - p. 7-9.
3. Babichev A.P., Motrenko P.D. Finishing and hardening processing of parts with a multi-contact vibro-impact tool. - Rostov n / D: DSTU Publishing Center, 2003. - 192 p.
4. Smelyansky V.M. Mechanics of hardening of parts by surface plastic deformation. Moscow: Mashinostroenie, 2002. 300 p.
5. Popova VV Surface plastic deformation and physicochemical treatment. Rubtsovsk: Rubtsovsk Industrial Institute, 2013. - 98 p.
6. Prikhodko V.M., Petrova L.G., Chudina O.V. Metallophysical foundations for the development of hardening technologies. Moscow, Mashinostroenie, 2003. 384 p.
7. Zaides S.A. New methods of surface plastic deformation in the manufacture of machine parts // Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University. G.I. Nosov. 2018. V.16. No. 3. pp. 129-139.
8. Zaides S.A., Ngo Cao Cuong. Influence of the kinematics of surface plastic deformation processes on the quality of the hardened layer // Uprochnyaya tekhnologii i pokrytiy. - 2017. No. 5 (149). pp. 235-240.
9. Zaides S. A., Bobrovsky I. N., Pham Van An. Influence of the kinematics of local deformation on the stress state of the surface layer // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2019. No. 5 (95). pp. 32-38.
10. Zaydes S. A., Pham Van Anh. Influence of the kinematics of a deforming tool on the stress state of the surface layer during hardening of cylindrical parts // Bulletin of Mechanical Engineering, No. 4, 2021.
11. Zaydes S.A., Pham Van Anh. Influence of the kinematics of the working tool under local loading on the stress state of the surface layer. Uprochnyaya tekhnologii i pokrytiy. Volume 15. No. 11 (179). 2019.
12. Zaides S.A. From the kinematics of the working tool to new processes of finishing and hardening // Bulletin of ISTU, 23(5), 2019.
13. Patent: Method for surface plastic deformation of the outer surfaces of bodies of revolution / RU No. 2758713, IPC V24V 39/04, published on 01.11.2021.
14. Chen X., Liu Y. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. CRC Press, 2014. 411 p.
15. Bruyaka V.A., Fokin V.G., Kuraeva Ya.V. Engineering analysis in ANSYS Workbench. Samara: Samar. state technical un-t, 2013. - 109 p.
16. Bakov K.A., ANSYS. User's guide, M.: ДМК Пресс, 2005. 650 p.
17. Jian Peng, Peishuang Zhou, Ying Wang, Qiao Dai, David Knowles and Mahmoud Mostafavi. Metals 2021, 11, 1627. <https://doi.org/10.3390/met11101627>.
18. Yueqi Bi, Xiaoming Yuan, Jishuang Lv, Rehmat Bashir, Shuai Wang and He Xue. Effect of Yield Strength Distribution Welded Joint on Crack Propagation Path and Crack Mechanical Tip Field. Materials 2021, 14, 4947. <https://doi.org/10.3390/ma14174947>.
19. Vishnyakov Ya.D., Piskarev V.D. Management of residual stresses in metals and alloys. Moscow, Metallurgy, 1989. 253 p.

20. Belov V.A. Influence of surface hardening of planes on their butt stiffness. Vestnik mashinostroeniya. - 1964. - No. 3. - P. 46–49.

21. Bubnov A.S. Stress state during straightening by constrained compression of rod products / A.S. Bubnov, S.A. Zaides // Processing of solid and layered materials: interuniversity international coll. scientific works / ed. G.S. Guna. - Magnitogorsk: MSTU, 2003. - P.18–22.

22. Xu, Y.; 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, 6511. <https://doi.org/10.3390/ma14216511>.

23. Bukaty S.A. Deformations of turbomachine blades after surface treatment. KuAI. - Kuibyshev, 1976. - Issue. 4. – P.72–79.

24. Method for determining the thickness of the hardened surface layer: Pat. 2194263 RF, IPC 7 G 01 No. 3/00 / M.M. Matlin, S.L. Lebsky, A.I. Frolova. VolgGTU. 2002.

25. Method for determining the relative degree of elastic-plastic deformation of the material: Pat. 2386116 RF, IPC G 01 No. 3/28. / MM. Matlin, S.L. Lebsky, A.I. Mozgunova, A.I. Frolova. GOU VPO VolgGTU. 2010.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.02.2022; одобрена после рецензирования 15.03.2022; принята к публикации 04.04.2022.

The article was submitted 24.02.2022; approved after reviewing 15.03.2022; assepted for publication 04.04.2022.

