

УДК 621.787.4

doi: 10.18698/0536-1044-2022-7-33-41

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

С.А. Зайдес, Нгуен Хыу Хай

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Influence of the Toroidal Tool Kinematics on Residual Stress-Strain State of the Surface Layer of Machine Parts

S.A. Zaides, Nguyen Huu Hai

Irkutsk National Research Technical University

Рассмотрен подход к увеличению сжимающих остаточных напряжений при поверхностном пластическом деформировании деталей машин. Техническая идея основана на рассмотрении кинематики рабочего инструмента. Предложен новый процесс упрочнения детали, основанный на круговой осцилляции рабочего инструмента. Для доказательства эффективности новой кинематики инструмента использовано конечно-элементное моделирование, которое позволило определить остаточные напряжения, возникающие при упрочнении деталей машин. Установлено, что с точки зрения увеличения остаточных напряжений осциллирующее движение рабочего ролика значительно эффективнее, чем статическое.

Ключевые слова: осциллирующее вращение, двухрадиусный ролик, глубина пластической деформации, остаточные напряжения, поверхностное пластическое деформирование

The article considers an approach to increasing compressive residual stresses during surface plastic deforming. The technical idea is based on the consideration of the kinematics of the working tool. A new hardening process based on the circular oscillation of the working tool is proposed. Finite element modeling which allows determining the residual stresses arising during hardening of machine parts was used to prove the effectiveness of the new kinematics of the tool. It has been found that in terms of increasing residual stresses, the oscillating movement of the working roller is much more efficient than the static one.

Keywords: oscillating rotation, two-radius roller, plastic deformation depth, residual stresses, surface plastic deformation

Изготовление деталей машин связано с силовыми и температурными воздействиями на обрабатываемый материал. В процессе формоизменения заготовки возникают временные напряжения, влияющие на физико-механические свойства материала, микрогеометрию поверхности и глубину упрочненного слоя [1, 2]. После завершения внешнего воздействия на заготовку происходит разгрузка материала с образованием остаточных напряжений (ОН),

которые влияют главным образом на эксплуатационные свойства деталей машин [3–5].

Такие напряжения классифицируют по объему, в котором они действуют [6, 7]. На прочность материала и стойкость к воздействию внешней среды наибольшее влияние оказывают макронапряжения или напряжения первого рода [8]. Для их определения используют, как правило, разрушающие и неразрушающие методы [7]. Первые позволяют доста-

точно точно определить значение ОН, но требуют разрушения детали. Неразрушающие методы сохраняют деталь, но точность определения ОН невысокая [9].

При поверхностном пластическом деформировании (ППД), которое достаточно широко применяют для повышения качества поверхностного слоя деталей машин, происходит пластическое деформирование только тонкого слоя детали. После прекращения воздействия рабочего инструмента (РИ) происходит выравнивание деформированного состояния в объеме тела с образованием ОН. При известных способах ППД в поверхностных слоях деталей машин образуются сжимающие ОН, оказывающие положительное влияние на их эксплуатационные свойства [2, 4, 5, 10].

В патенте [11] предложен новый способ ППД, основанный на круговой осцилляции РИ. В связи с этим возник вопрос о величине и характере распределения ОН в поверхностных слоях упрочненных деталей.

В последние годы разработаны мощные компьютерные программы на основе метода конечных элементов, которые позволяют достаточно точно определить не только напряженное состояние в очаге деформации, но и ОН в упрочненных деталях.

Цель работы — определение ОН в поверхностном слое деталей машин, упрочненных круговой осцилляцией РИ и сравнение полученных результатов с данными известных схем нагружения.

Кинематические схемы ППД. Рассмотрим несколько схем локального нагружения роликов

на плоскую поверхность детали. Первая кинематическая схема (рис. 1, а) отражает статическое локальное нагружение жестким роликом силой F .

Вторая (рис. 1, б) и третья (рис. 1, в) кинематические схемы представляют собой новый процесс упрочнения, основанный на осциллирующем вращении РИ относительно вертикальной оси с амплитудой угла $\pm\alpha$ ($-180^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$). Разница между ними заключается в том, что во второй схеме деформирующим элементом служит жесткий ролик с профильным радиусом r , а в третьей — двухрадиусный ролик с профильным радиусом $r/2$.

Схема кругового осциллирующего вращения с углом α показана на рис. 1, г.

Новая кинематика РИ 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 ОН поверхностного слоя при обработке ППД широко используют метод конечных элементов (МКЭ). Одной из универсальных и широко применяемых программ, основанных на использовании МКЭ, является ANSYS [12–14].

Программный комплекс ANSYS предназначен для численного решения задач механики

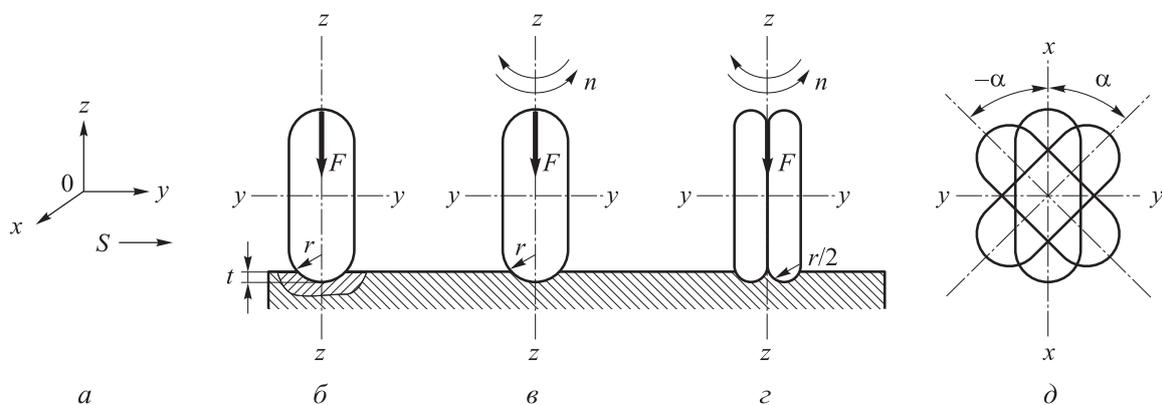


Рис. 1. Кинематические схемы нагружения поверхности образца жестким роликом при разных условиях контакта с обрабатываемой поверхностью (а–в) и схема кругового осциллирующего вращения с углом $\pm\alpha$ (г): а — роликом без вращения; б и в — одно- и двухрадиусными роликами с осциллирующим вращением относительно вертикальной оси $z-z$

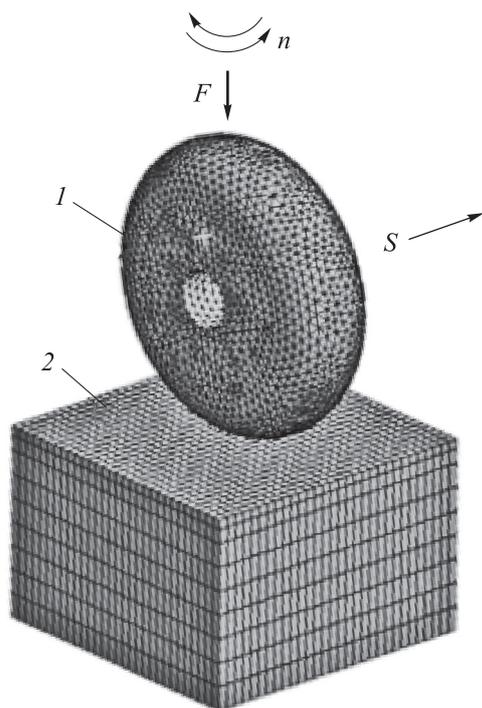


Рис. 2. Конечно-элементная модель при нагружении образца РИ:
1 — жесткий деформирующий ролик;
2 — модель (образец)

деформируемых тел и ряда других задач. Моделирование процесса обкатки роликами в программе ANSYS дает возможность определить все необходимые характеристики процесса: ОН, упругие и пластические деформации, глубину упрочненного слоя и т. д., что позволяет оценить и выбрать технологический процесс ППД и обосновать необходимую геометрию РИ.

Деформирующий ролик совершает осциллирующее вращение с частотой n относительно вертикальной оси z (см. рис. 1 и 2), перемещается в осевом направлении по направлению продольной подачи S и внедряется в обрабатываемую поверхность с натягом t (см. рис. 1).

Для расчета напряженно-деформированного состояния 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 $^{-1}$; коэффициент трения в зоне контакта РИ с образцом $f = 0,1$; амплитуда угла осцилляции $\alpha = \pm 30^\circ$, скорость продольного перемещения роликов, равная подаче $S = 0,2$ мм/с.

Характеристики заготовки: размеры модели (образца) — $30 \times 30 \times 30$ 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 упрочнения $E_T = 1,45 \cdot 10^3$ МПа).

Для оценки обобщенного напряженного состояния в разных точках тела с учетом ОН, действующих по осям O_z , O_x , O_y , определена интенсивность напряжений по Мизесу [15–17]

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

где σ_z^{OCT} , σ_x^{OCT} и σ_y^{OCT} — компоненты ОН, действующие по осям O_z , O_x и O_y .

Результаты компьютерного моделирования остаточного напряженно-деформированного состояния. Остаточные напряжения. В качестве примера на рис. 3 приведены поля интенсивности ОН σ_i^{OCT} при разных схемах нагружения.

Анализ полей интенсивности ОН показывает, что при круговой осцилляции двухрадиусного ролика (см. рис. 1, в) возникает наибольшая интенсивность максимальных ОН (см. рис. 3, в), а при статическом скольжении ролика (см. рис. 1, а) — наименьшая (см. рис. 3, а). Как видно из рис. 3, интенсивность ОН возрастает при более сложной кинематике деформирующего инструмента с двухрадиусной формой профиля рабочей поверхности.

Зависимость интенсивности максимальных ОН от схемы нагружения РИ приведена на рис. 4. Здесь и далее схемы а–в соответствуют первой, второй и третьей схемам, показанным на рис. 1, а–в.

Анализ рис. 4, позволяет предположить, что при схеме статического скольжения ролика (см. рис. 1, а) происходит минимальное искажение структуры зерен материала.

При нагружении ролика по второй схеме (см. рис. 1, б) возникает большее трение в зоне контакта, при котором усиливается искажение структуры материала поверхностного слоя. Деформационные процессы дополнительно усиливаются вследствие изменения положения очага деформации относительно оси x – x . Это объясняется тем, что пластические отпечатки

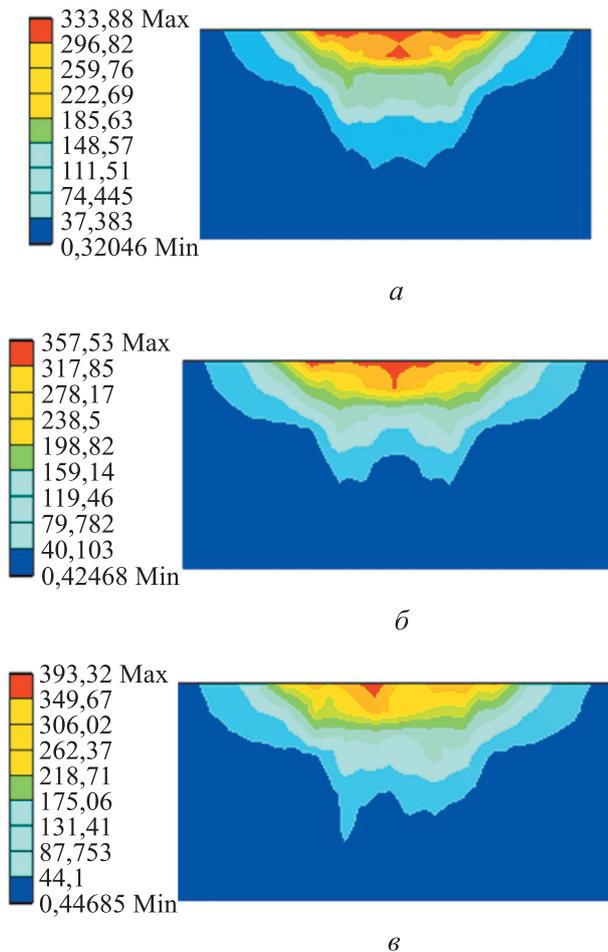


Рис. 3. Поля интенсивности ОН $\sigma_i^{\text{ост}}$, МПа, при первой (а), второй (б) и третьей (в) схемах нагружения

от РИ на поверхности детали, представляющие собой эллипс, постоянно циклически изменяют ориентацию большой и малой осей.

При осциллирующем вращении двухрадиусного ролика относительно оси $z-z$ (см. рис. 1, в) происходит искажение кристаллической структуры материала из-за сдвига зерен в разных направлениях, что способствует росту дислокаций и повышению прочности поверхностного слоя.

Также можно сделать вывод, что продольное перемещение деформирующего инструмента с двухрадиусной формой профиля рабочей поверхности значительно влияет на интенсивность максимальных ОН. Установлено, что при осциллирующем вращении двухрадиусного ролика ОН почти на 40 % больше, чем при статическом скольжении ролика.

Полученные значения компонент максимальных ОН при разных схемах нагружения РИ приведены в таблице, из которой следует,

что с усложнением кинематики РИ возрастают все компоненты тензора ОН.

Кроме того, в направлении профильного радиуса ролика (ось x) все компоненты ОН больше, чем в направлении оси y (радиус ролика $D/2$). 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.

Распределение интенсивности максимальных ОН $\sigma_i^{\text{ост}}$ по глубине поверхностного слоя при разных схемах нагружения РИ приведено на рис. 5.

Анализ ОН после упрочнения образцов показал, что чем сложнее кинематика деформирующего инструмента, тем больше значение ОН. При осциллирующем вращении двухрадиусного ролика достигается наибольшее максимальное ОН, которое на 10,7 % выше, чем при статическом скольжении ролика.

При всех схемах упрочнения сжимающие ОН распределяются на глубине около 3,5 мм (см. рис. 5). Наибольшие ОН формируются не на поверхности, а на некоторой глубине. В рассматриваемом случае эта глубина в 8 раз превышает величину внедрения роликов.

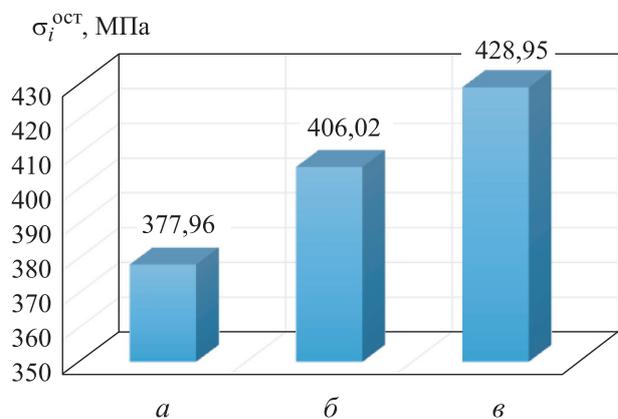


Рис. 4. Зависимость интенсивности максимальных ОН $\sigma_i^{\text{ост}}$ от схемы нагружения РИ

Значения компонент максимальных ОН при разных схемах нагружения РИ

Схема нагружения	Максимальные ОН, МПа		
	$\sigma_y^{\text{ост}}$	$\sigma_x^{\text{ост}}$	$\sigma_z^{\text{ост}}$
а	-380,00	-403,12	-92,88
б	-434,31	-411,04	-105,69
в	-458,05	-420,87	-112,97

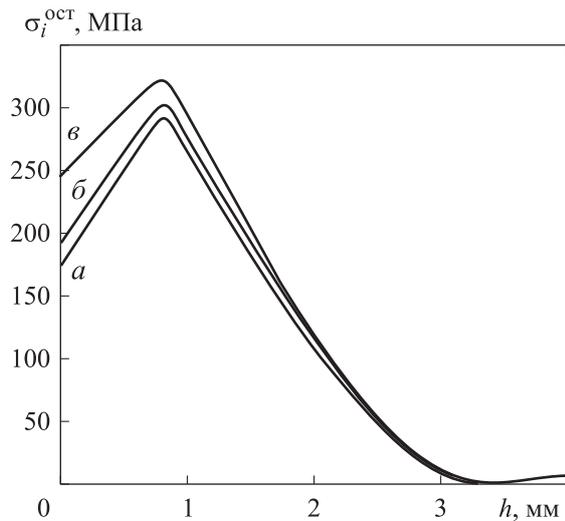


Рис. 5. Распределение интенсивности максимальных ОН $\sigma_i^{ост}$ по глубине поверхностного слоя h при первой (а), второй (б) и третьей (в) схемах нагружения РИ

Такой характер изменения напряжений, по-видимому, оказывает положительное влияние на дислокационные процессы, которые развиваются изнутри слоя, что способствует вовлечению в деформационный процесс большего объема материала.

Распределение компоненты ОН $\sigma_z^{ост}$ по глубине поверхностного слоя при разных схемах нагружения РИ показано на рис. 6.

Анализ рис. 6 позволяет заключить, что при всех схемах нагружения РИ компонента ОН $\sigma_z^{ост}$ на поверхности детали равна нулю. Глубина залегания максимальных ОН сжатия почти в 8 раз превышает глубину внедрения роликов. При осциллирующем вращении двухрадиусного ролика компонента ОН $\sigma_z^{ост}$ достигает максимального значения, которое в 1,56 раза

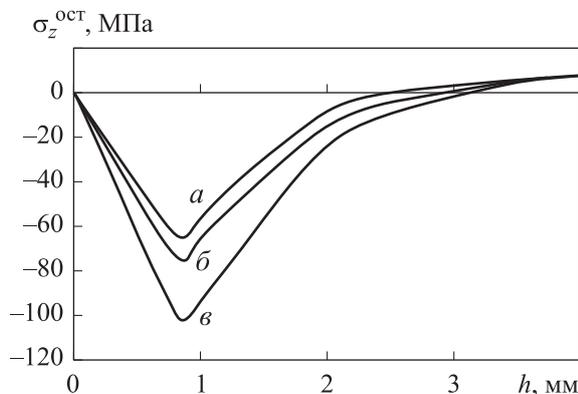


Рис. 6. Распределение компоненты ОН $\sigma_z^{ост}$ по глубине поверхностного слоя h при первой (а), второй (б) и третьей (в) схемах нагружения РИ

больше, чем при статическом скольжении ролика.

Деформация поверхностного слоя. При нагружении поверхностного слоя тороидальным роликом формируется пластический слой, который изменяет структуру и физико-механические свойства металла, повышает прочностные свойства и коррозионную стойкость, снижает пластичность и т. д. [18, 19].

Распределение относительной пластической деформации по глубине образца при разных схемах нагружения РИ показано на рис. 7.

Как видно из рис. 7, при всех схемах нагружения РИ максимальная пластическая деформация возникает в зоне контакта и убывает в направлении к центру образца: при осциллирующем вращении двухрадиусного ролика достигается ее наибольшее значение, при статическом скольжении ролика — наименьшее. При осциллирующем вращении двухрадиусного ролика относительная пластическая деформация в 1,36 раза больше, чем при статическом скольжении ролика.

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

Глубина пластической деформации является важным параметром при оценке физико-механических и эксплуатационных свойств упрочненных ППД деталей [20]. Результаты определения зоны пластической деформации образца после упрочнения двухрадиусным роликом приведены на рис. 8, а и б.

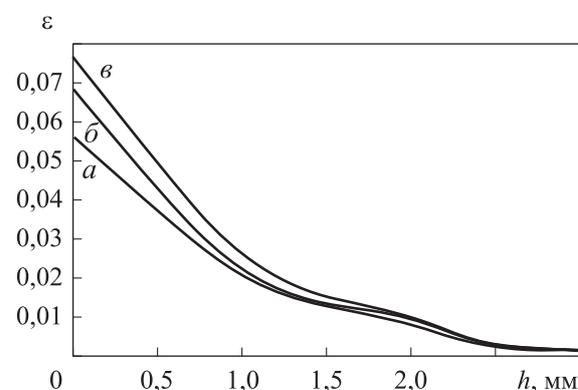
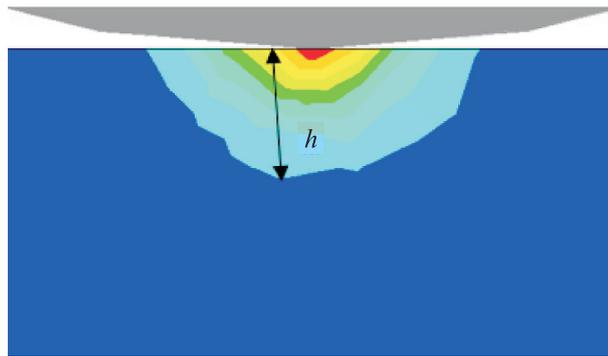
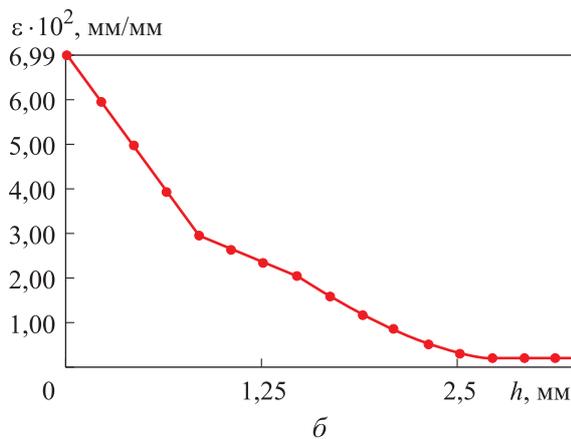


Рис. 7. Распределение относительной пластической деформации ϵ по глубине образца h при первой (а), второй (б) и третьей (в) схемах нагружения РИ



а



б

Рис. 8. Результаты определения зоны пластической деформации образца после упрочнения двухрадиусным роликом: а — поле пластической деформации; б — распределение пластической деформации по глубине h

Как видно из рис. 8, б, при осциллирующем вращении двухрадиусного ролика пластическая деформация достигает максимального значения в центральной зоне контакта и убывает в направлении толщины поверхностного слоя. В зоне толщиной $h > 2,5$ мм пластическая деформация близка к нулю. Таким образом, зона пластической деформации при нагружении двухрадиусным роликом находится в интервале $0 \leq h < 2,5$ мм.

Ниже приведена глубина пластической деформации при различных схемах нагружения роликов (см. рис. 1), мм:

а.....	1,8
б.....	2,1
в.....	2,5

Литература

- [1] Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. Москва, Машиностроение, 1987. 328 с.

При осциллирующем вращении двухрадиусного ролика достигается наибольшая глубина пластической деформации, которая на 40 % больше, чем при статическом скольжении ролика.

Результаты исследования доказывают эффективность нового способа ППД на основе осциллирующего вращения двухрадиусного ролика. С использованием конечно-элементного моделирования установлено, что предлагаемые геометрия и кинематика движения ролика существенно влияют на остаточное напряженное состояние и глубину пластической деформации в упрочненном слое.

Выводы

1. На основе МКЭ и компьютерной программы ANSYS разработана конечно-элементная модель процесса упрочнения для разных кинематических движений РИ. Это позволило установить влияние кинематики РИ на ОН в упрочненном слое. Результаты моделирования и численных расчетов показали эффективность нового способа отделочно-упрочняющей обработки — ППД круговой осцилляцией РИ.

2. При одинаковых условиях упрочнения интенсивность ОН возрастает в следующей очередности: статическое скольжение ролика, осциллирующее вращение одно- и двухрадиусного ролика. Упрочнение двухрадиусным роликом приводит к повышению ОН более чем на 40 % по сравнению с ОН при статическом скольжении ролика. Расчеты показали, что максимальные ОН сжатия формируются не на поверхности, а на некоторой глубине упрочненного слоя, которая в 8 раз превышает величину внедрения роликов.

3. При осциллирующем вращении двухрадиусного ролика максимальное значение относительной пластической деформации в 1,36 раза больше, чем при статическом скольжении ролика. Глубина пластической деформации увеличивается в очередности, описанной для ОН. При осциллирующем вращении двухрадиусного ролика достигается наибольшая глубина пластической деформации, которая на 40 % больше, чем при статическом скольжении ролика.

- [2] Алексеев П.Г. Повышение износостойкости стальных деталей путем поверхностного упрочнения. *Станки и инструмент*, 1968, № 1, с. 7–9.
- [3] Смелянский В.М. *Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием*. Москва, Машиностроение, 2002. 300 с.
- [4] Белов В.А. Поверхностное упрочнение плоскостей повышает их износостойкость. *Машиностроитель*, 1966, № 9, 19 с.
- [5] Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. *Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин*. Москва, Машиностроение, 1988. 239 с.
- [6] Зайдес С.А. *Остаточные напряжения и качество калиброванного металла*. Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 1992. 200 с.
- [7] Brown M., Wright D., Saoubi R.M. et al. Destructive and non-destructive testing methods for characterization and detection of machining-induced white layer: a review paper. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 2018, vol. 23, pp. 39–53, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.10.001>
- [8] Блюменштейн В.Ю., Махалов М.С. Влияние режимов на формирование остаточных напряжений в поверхностном слое при размерном совмещенном обкатывании. *Обработка металлов*, 2008, № 2, с. 15–22.
- [9] *Остаточные напряжения и методы регулирования*. Москва, Институт проблем механики АН СССР, 1982. 412 с.
- [10] Поляк М.С. *Технология упрочнения*. Т. 2. Москва, Машиностроение, 1995. 688 с.
- [11] Зайдес С.А., Нгуен Х.Х. *Способ поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения*. Патент РФ 2758713. Заявл., 14.01.2021, опубл. 01.11.2021.
- [12] Chen X., Liu Y. *Finite element modeling and simulation with ANSYS workbench*. CRC Press, 2014. 411 p.
- [13] Бруняка В.А., Фокин В.Г., Кураева Я.В. *Инженерный анализ в ANSYS Workbench*. Ч. 2. Самара. СамГТУ, 2013. 75 с.
- [14] Баков К.А. *ANSYS. Справочник пользователя*, Москва, ДМК Пресс, 2005. 650 с.
- [15] Зайдес С.А., Исаев А.Н. *Технологическая механика осесимметричного деформирования*. Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 2007. 432 с.
- [16] Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. *Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах*. Москва, Металлургия, 1989. 253 с.
- [17] Bi Y., Yuan X., Lv J. et al. Effect of yield strength distribution welded joint on crack propagation path and crack mechanical tip field. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 17, art. 4947, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14174947>
- [18] Кречетов А.А., Блюменштейн В.Ю. Модель процесса накопления деформации на стадии циклической долговечности. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2005, № 4, с. 11–13.
- [19] Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И. *Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации*. Москва, Машиностроение, 1986. 224 с.
- [20] Букатый С.А. Деформации лопаток турбомашин после обработки поверхности. В: *Вопросы прочности элементов авиационных конструкций*. Куйбышев, КуАИ, 1986, с. 72–79.

References

- [1] Odintsov L.G. *Uprochnenie i otdelka detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Parts hardening and finishing by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 328 p. (In Russ.).
- [2] Alekseev P.G. Raising efficiency of wear-resistant steel parts by surface hardening. *Stanki i instrument*, 1968, no. 1, pp. 7–9. (In Russ.).
- [3] Smelyanskiy V.M. *Mekhanika uprochneniya detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Mechanics of parts hardening by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 300 p. (In Russ.).

- [4] Belov V.A. Surface hardening of plane surfaces improves their wear-resistance. *Mashinostroitel'*, 1966, no. 9, 19 p. (In Russ.).
- [5] Sulima A.M., Shulov V.A., Yagodkin Yu.D. *Poverkhnostnyy sloy i ekspluatatsionnye svoystva detaley mashin* [Surface layer and exploitation properties of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 239 p. (In Russ.).
- [6] Zaydes S.A. *Ostatochnye napryazheniya i kachestvo kalibrirovannogo metalla* [Residual stress and quality of graded metal]. Irkutsk, Izd-vo IrGTU Publ., 1992. 200 p. (In Russ.).
- [7] Brown M., Wright D., Saoubi R.M. et al. Destructive and non-destructive testing methods for characterization and detection of machining-induced white layer: a review paper. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 2018, vol. 23, pp. 39–53, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.10.001>
- [8] Blyumenshteyn V.Yu., Makhalov M.S. Impact of cutting regimes on residual stress in a surface layer dimensional at dimensional coincident rolling. *Obrabotka metallov* [Metal Working and Material Science], 2008, no. 2, pp. 15–22. (In Russ.).
- [9] *Ostatochnye napryazheniya i metody regulirovaniya* [Residual stress and methods for its regulation]. Moscow, Institut problem mekhaniki ANSSSR Publ., 1982. 412 p. (In Russ.).
- [10] Polyak M.S. *Tekhnologiya uprochneniya. T. 2* [Hardening technology. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 688 p. (In Russ.).
- [11] Zaydes S.A., Nguen Kh.Kh. *Sposob poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya naruzhnykh poverkhnostey tel vrashcheniya* [Method for surface plastic deformation of the outer surfaces of bodies of rotation]. Patent RU 2758713. Appl., 14.01.2021, publ. 01.11.2021. (In Russ.).
- [12] Chen X., Liu Y. *Finite element modeling and simulation with ANSYS workbench*. CRC Press, 2014. 411 p.
- [13] Bruyaka V.A., Fokin V.G., Kuraeva Ya.V. *Inzhenernyy analiz v ANSYS Workbench*. Ch. 2 [Engineering analysis in ANSYS WorkBench. P. 2]. Samara, SamGTU Publ., 2013. 75 p. (In Russ.).
- [14] Bakov K.A. *ANSYS. Spravochnik pol'zovatelya* [ANSYS. user guide]. Moscow, DMK Press, 2005. 650 p. (In Russ.).
- [15] Zaydes S.A., Isaev A.N. *Tekhnologicheskaya mekhanika osesimmetrichnogo deformirovaniya* [Technological mechanics of axial-symmetric deformation]. Irkutsk, Izd-vo IrGTU Publ., 2007. 432 p. (In Russ.).
- [16] Vishnyakov Ya.D., Piskarev V.D. *Upravlenie ostatochnymi napryazheniyami v metallakh i splavakh* [Control on residual stress in metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989. 253 p. (In Russ.).
- [17] Bi Y., Yuan X., Lv J. et al. Effect of yield strength distribution welded joint on crack propagation path and crack mechanical tip field. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 17, art. 4947, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14174947>
- [18] Krechetov A.A., Blyumenshteyn V.Yu. Model of strain accumulation process at the stage of cycle life. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2005, no. 4, pp. 11–13. (In Russ.).
- [19] Drozd M.S., Matlin M.M., Sidyakin Yu.I. *Inzhenernye raschety uprugoplasticheskoy kontaktnoy deformatsii* [Engineering calculation of elastic-plastic contact deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 224 p. (In Russ.).
- [20] Bukatyy S.A. Deformatsii lopatok turbomashin posle obrabotki poverkhnosti [Turbomachine blade deformation after surface processing]. V: *Voprosy prochnosti elementov aviatsionnykh konstruksiy* [In: Strength problem of aviation construction parts]. Kuybyshev, KuAI Publ., 1986, pp. 72–79. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 21.03.2022

Информация об авторах

ЗАЙДЕС Семен Азикович — доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение, сварочные и аддитивные технологии». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: zsa@istu.edu).

НГУЕН Хыу Хай — аспирант кафедры «Материаловедение, сварочные и аддитивные технологии». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: nquan6799@gmail.com).

Information about the authors

ZAIDES Semen Azikovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: zsa@istu.edu).

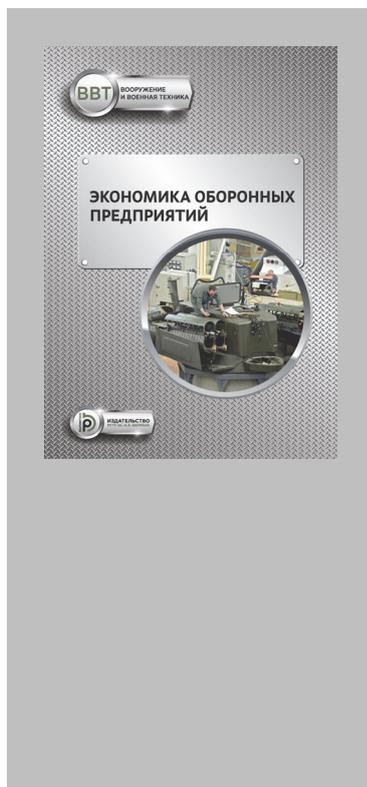
NGUYEN Huu Hai — Postgraduate, Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: nquan6799@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Влияние кинематики тороидального инструмента на остаточное напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя деталей машин. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 7, с. 33–41, doi: 10.18698/0536-1044-2022-7-33-41

Please cite this article in English as:

Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. Influence of the Toroidal Tool Kinematics on Residual Stress-Strain State of the Surface Layer of Machine Parts. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 7, pp. 33–41, doi: 10.18698/0536-1044-2022-7-33-41



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебник под редакцией В.В. Селиванова «Экономика оборонных предприятий»

Авторы: М.В. Гордин, Ю.Д. Ильин,
В.В. Селиванов, Е.А. Старожук

В систематизированном виде изложены вопросы состояния и развития предприятий оборонно-промышленного комплекса во взаимосвязи с задачами военной экономики Российской Федерации. Содержание учебника соответствует курсу лекций, читаемых авторами в МГТУ им. Н.Э. Баумана студентам, обучающимся по специальности «Боеприпасы и взрыватели», а также многочисленным публикациям, посвященным исследованиям и разработкам вооружения, военной и специальной техники и боеприпасов.

Для студентов и аспирантов технических университетов и машиностроительных вузов, курсантов военных училищ, слушателей и адъюнктов военных академий.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@baumanpress.ru; <https://bmstu.press>