

УДК 621.787.4

## Влияние кинематики рабочего инструмента на качество деталей машин при поверхностном пластическом деформировании

С.А. Зайдес, Хыу Хай Нгуен

Иркутский национальный исследовательский технический университет

## Working tool kinematics influence on the machine parts quality at the plastic deformation

S.A. Zaides, Huu Hai Nguyen

Irkutsk National Research Technical University

Проведены исследования по определению влияния кинематики рабочего инструмента на качество деталей машин при поверхностном пластическом деформировании. Установлено, что по сравнению с тороидальным роликом, вращающимся относительно центральной оси, и с роликом, совершающим круговое вращение относительно центральной оси, которая проходит через плоскость, соединяющую однорadiusные элементы, тороидальный ролик с реверсивным круговым движением при поверхностном пластическом деформировании имеет преимущества. Это уменьшение параметров шероховатости поверхности упрочненной детали  $Ra$  на 77,3 и 33,3 % и  $Rz$  на 33,7 и 14,5 %; снижение размера зерен на 89,0 и 83,3 %; повышение микротвердости поверхностного слоя на 40,4 и 25,5 %; возрастание глубины наклепа на 18,2 и 6,1 %; повышение максимальных остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое на 34,4 и 15,5 %; рост плотности дислокаций в 11,4 и 3,2 раза соответственно.

**EDN:** USICCA, <https://elibrary/usicca>

**Ключевые слова:** реверсивное выглаживание, микротвердость поверхности, шероховатость поверхности, двухradiusный ролик, глубина наклепа, плотность дислокаций

Research was carried out to determine the working tool kinematics influence during the surface plastic deformation on the machine parts quality. It was established that, a toroidal roller with the reverse circular motion had advantages at the surface plastic deformation and hardening in comparison with a toroidal roller rotating relative to the central axis and with a roller performing a circular rotation relative to the central axis passing through the plane that connected the single-radius elements. Those included decrease in the surface roughness parameters of the  $Ra$  hardened part by 77.3 and 33.3% and  $Rz$  - by 33.7 and 14.5%; grain size reduction by 89.0 and 83.3%; increase in the surface layer micro-hardness by 40.4 and 25.5%; increase in the hardening depth by 18.2 and 6.1%; increase in the maximum compressive residual stresses in the surface layer by 34.4 and 15.5%; increase in the dislocation density by 11.4 and 3.2 times, respectively.

**EDN:** USICCA, <https://elibrary/usicca>

**Keywords:** reverse burnishing, surface micro-hardness, surface roughness, two-radius roller, work hardening depth, dislocation density

Надежность изделий машиностроения во многом зависит от качества изготовления их отдельных деталей. Характеристики качества можно подразделить на две группы: отражающие точность изготовления деталей и оценивающие состояние поверхностного слоя.

Точность детали обычно обеспечивается механической обработкой резанием, а улучшение состояния поверхностного слоя — отделочно-упрочняющими способами обработки, среди которых поверхностное пластическое деформирование (ППД) занимает лидирующую позицию [1–3].

Состояние поверхностного слоя оказывает существенное влияние на усталостную прочность, коррозионную стойкость, износостойкость, ударную вязкость и другие эксплуатационные характеристики деталей машин. Эксплуатационные характеристики отдельных деталей в значительной мере определяют ресурс изделия в целом [4–6].

Применение ППД повышает надежность машиностроительных изделий благодаря сглаживанию микронеровностей поверхности, снижающих концентрацию напряжений; повышению твердости и глубины упрочненного слоя, влияющих на износостойкость и контактную выносливость; формированию остаточных напряжений сжатия (ОНС) в поверхностных слоях, от которых зависит усталостная прочность упрочненных деталей [2, 3, 7, 8].

Первоначально в качестве рабочего инструмента (РИ) для ППД использовали широкие режущие-деформирующие резцы, предназначенные в основном для сглаживания микронеровностей поверхности. Позднее стали применять шарики от шарикоподшипников, ролики разной конструкции, алмазные выглаживатели и другие деформирующие инструменты [9, 10].

В практике отделочно-упрочняющей обработки ППД используют разнообразные способы, основанные на сочетании элементарных движений — прямолинейного и вращательного, которые выражают абсолютные движения, сообщаемые РИ и обрабатываемой детали [11].

К настоящему времени в технологии ППД достигнуты значительные теоретические и практические результаты, разработан ряд новых технологий, определены рациональные режимы упрочнения, созданы новые конструкции РИ, позволяющие обрабатывать различные по форме и габаритным размерам детали машин [12, 13].

Однако при изготовлении и упрочнении нежестких деталей типа валов, осей и штоков возникают проблемы, связанные с обеспечением их точности и стабильности характеристик качества по длине обработки [14, 15]. Такие детали считаются нетехнологичными, так как и при обработке резанием, и при ППД они легко искривляются под действием радиальной силы вследствие воздействия РИ. Уменьшая радиальную силу от натяга РИ, можно снизить величину искривления, но нельзя получить заданные характеристики качества поверхностного слоя (степень наклепа, шероховатость и др.).

Для решения указанной проблемы предлагается использовать более сложную кинематику РИ. Выдвинута следующая рабочая гипотеза: повысить напряженное состояние в очаге деформации без увеличения радиального натяга можно, если применять более сложную кинематику параметров РИ.

Предложенная гипотеза построена на анализе энергии деформации поверхностного слоя. Чем сложнее кинематика РИ, тем больше по величине совершаемая работа и накапливаемая энергия деформации. По мнению некоторых исследователей, именно накопленная энергия пластической деформации представляет собой комплексный показатель качества материала поверхностного слоя [16].

Выдвинутая гипотеза достаточно убедительно согласуется с физическими закономерностями, происходящими в поверхностном слое при ППД. Накопленная энергия пластической деформации коррелирует со свойствами и параметрами состояния деформирующего металла, так как она практически полностью определяет энергию дислокаций, образовавшихся при деформации [17]. А свойства и состояние поверхностного слоя зависят от его качества, которое непосредственно влияет на эксплуатационные характеристики деталей машин.

Цель работы — определение влияния кинематики РИ в виде тороидального ролика при ППД на основные показатели качества упрочненных деталей.

**Кинематические схемы ППД.** Для оценки эффективности кинематики РИ рассмотрены три схемы упрочнения цилиндрической поверхности (рис. 1, а–в).

При обкатке двухрадиусным роликом (см. рис. 1, а) заготовке сообщают вращательное движение относительно собственной продоль-

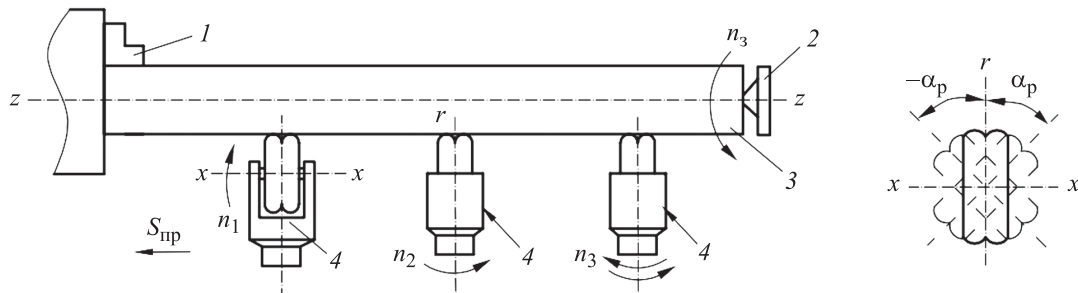


Рис. 1. Кинематические схемы ППД при различных условиях контакта РИ с обрабатываемой поверхностью (а–в) и схема реверсивного вращения РИ (з): а — роликом, вращающимся относительно оси  $x-x$ ; б и в — роликом, совершающим круговое и реверсивное вращение относительно оси  $r$  соответственно; 1 — трехкулачковый патрон; 2 — задняя бабка; 3 — заготовка; 4 — РИ

ной оси  $z-z$ , а РИ, оказывающему давление на поверхность обрабатываемой заготовки, — продольную подачу  $S_{пр}$ .

Новые кинематические схемы ППД, основанные на применении более сложной кинематики РИ [18], приведены на рис. 1, б и в. Различие между ними заключается в том, что в схеме, приведенной на рис. 1, б, ролику дополнительно сообщают круговое вращательное движение относительно оси  $r$ , а в схеме, показанной на рис. 1, в, — реверсивное вращение относительно оси  $r$ , проходящей через плоскость, соединяющую два ролика РИ и перпендикулярно оси заготовки с круговой амплитудой угла  $\alpha_p$  (рис. 1, з).

Для сопоставления эксплуатационных характеристик поверхностного слоя цилиндрических деталей после ППД с разной кинематикой РИ использовали образцы из среднеуглеродистой стали 45 диаметром 30 мм. Экспериментальные исследования проводили на токарном станке 1К62. При упрочнении ППД с разной кинематикой РИ применяли ролик с двумя профильными радиусами из инструментальной стали SKD-11 (аналогами которой являются X12M, X12MФ, X12Ф1) диаметром 30 мм с профильным радиусом 2,5 мм. Методика и техника проведения экспериментальных исследований описаны в работе [19].

#### Шероховатость поверхностного слоя.

Чтобы достичь наименьшей шероховатости упрочненных деталей, для всех указанных схем обработки выбраны рациональные режимы упрочнения, обеспечивающие такое качество поверхности: продольная подача  $S_{пр} = 0,07$  мм/об, частота вращения заготовки  $n_3 = 100$  мин<sup>-1</sup> и радиальный натяг  $t = 0,07$  мм.

При обкатке по схеме, показанной на рис. 1, б, ролику дополнительно сообщают кру-

говое вращательное движение с частотой  $n_2 = 240$  мин<sup>-1</sup>, а при обработке по схеме, приведенной на рис. 1, в, — реверсивное вращение с частотой  $n_3 = 120$  дв.ход/мин и круговой амплитудой угла  $\alpha_p = 15^\circ$ .

Шероховатость поверхности оценивали по следующим параметрам [1]:  $Ra$  — среднему арифметическому из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины;  $Rz$  — сумме средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины.

Методика и техника проведения экспериментальных исследований шероховатости поверхности описаны в работе [19]. Зависимости параметров шероховатости  $Ra$  и  $Rz$  образцов от схемы нагружения РИ приведены на рис. 2, а и б, где 1–3 соответствуют схемам, показанным на рис. 1, а–в.

Как видно из рис. 2, по сравнению с шероховатостью неупрочненного образца после обкатки по первой схеме (см. рис. 1, а) параметры шероховатости упрочненных деталей  $Ra$  и  $Rz$  уменьшаются в 2,2 и 2,5 раза соответственно, а по второй схеме (см. рис. 1, б) — в 6,4 и 3,8 раза соответственно. Наименьшая шероховатость получена при реверсивном выглаживании (см. рис. 1, в), причем по сравнению с шероховатостью неупрочненного образца параметры  $Ra$  и  $Rz$  уменьшаются в 9,6 и 4,5 раза соответственно.

Анализ экспериментальных результатов показал, что реверсивное выглаживание более эффективно сглаживает микронеровности поверхности деталей, чем два других способа. После реверсивного выглаживания параметры шероховатости упрочненных деталей  $Ra$  уменьшаются на 77,3 и 33,3 %, а  $Rz$  — на 33,7 и 14,5 %, соответственно.

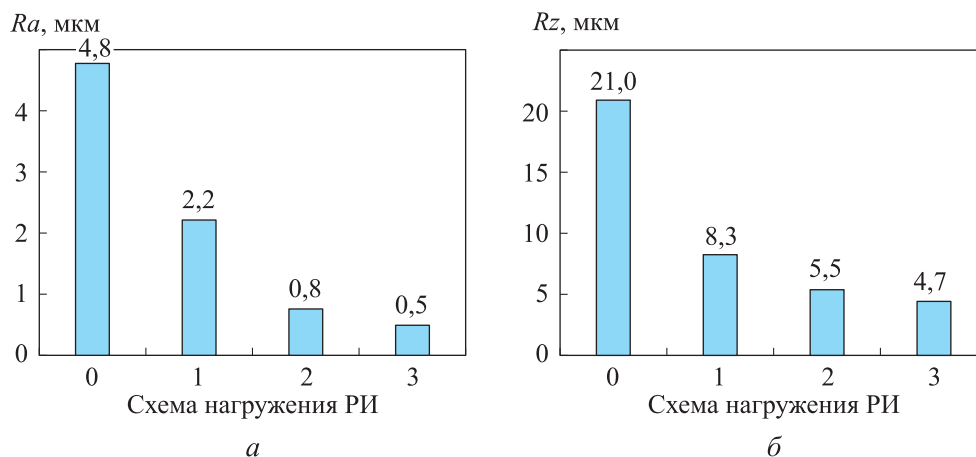


Рис. 2. Зависимости параметров шероховатости образцов  $Ra$  (а) и  $Rz$  (б) от схемы нагружения РИ: 0 — неупрочненный образец; 1 — вращение ролика относительно оси  $x$ - $x$ ; 2 и 3 — круговое и реверсивное вращение ролика относительно оси  $r$  соответственно

**Микроструктура и микротвердость поверхностного слоя.** Чтобы достичь наименьшего размера зерен и наибольшей микротвердости поверхностного слоя упрочненных деталей, для выбранных кинематик РИ приняты следующие рациональные режимы упрочнения: продольная подача  $S_{пр} = 0,07$  мм/об, частота вращения заготовки  $n_3 = 300$  мин<sup>-1</sup>, радиальный натяг  $t = 0,2$  мм. При обкатке по схеме, показанной на рис. 1, б, ролику дополнительно сообщают круговое вращательное движение с частотой  $n_2 = 600$  мин<sup>-1</sup>, а при обработке по схеме, приведенной на рис. 1, в, — реверсивное вращение с частотой  $n_3 = 300$  дв.ход/мин и круговой амплитудой угла  $\alpha_p = 60^\circ$ .

Методика и техника проведения экспериментальных исследований микроструктуры и микротвердости поверхностного слоя описаны в работах [20, 21]. Измерение микроструктуры проводили на глубине около 0,15 мм от поверхности образцов.

Микроструктура и микротвердость поверхностного слоя упрочненных деталей в интенсивно деформированном слое при разных схемах нагружения приведены в таблице. Микроструктура поверхностного слоя, упрочненного по схеме с реверсивно вращающимся роликом, показана с увеличением  $\times 1000$ , остальные микроструктуры — с увеличением  $\times 500$ .

Из таблицы следует, что после обкатки роликом поверхностного слоя образца размер его зерен уменьшается: по первой схеме (см. рис. 1, а) — на 69,4 %, по второй схеме (см. рис. 1, б) — на 79,8 %, по третьей схеме (см. рис. 1, в) — на 96,6 %.

Экспериментальные результаты исследования подтверждают, что с точки зрения измельчения зерен поверхностного слоя упрочненных деталей реверсивное выглаживание эффективнее, чем обкатка тороидальным роликом по схемам, показанным на рис. 1, а и б. По сравнению с ними реверсивное выглаживание снижает размер зерен на 89,0 и 83,3 % соответственно.

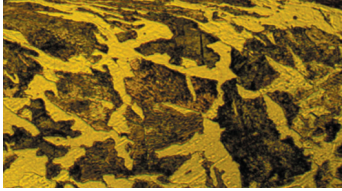
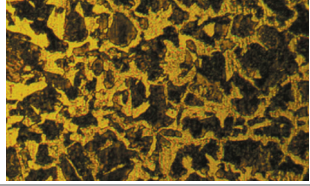
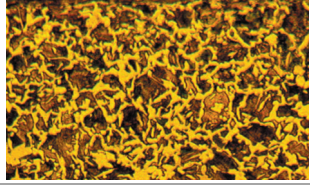
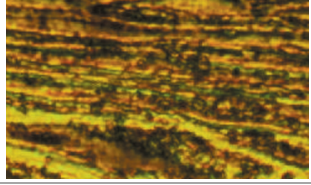
Установлено, что микротвердость поверхностного слоя увеличивается с уменьшением размера зерен в следующей очередности: реверсивное вращение РИ относительно оси  $r$ , круговое вращение РИ относительно оси  $r$  и вращение РИ относительно оси  $x$ - $x$ .

Следует отметить, что реверсивное движение РИ базировалось на идее перемешивания зеренной структуры, которое позволяет «раздробить» зерна и создать более эффективный дислокационный процесс для упрочнения поверхностного слоя.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили начальную гипотезу — после реверсивного выглаживания средний размер зерен в поверхностном слое составил 1,2...1,5 мкм, что в 25–30 раз меньше, чем в недеформированном металле. Микротвердость при этом увеличивалась в 2,4 раза.

Распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя упрочненных деталей при разных схемах нагружения тороидального ролика показано на рис. 3. Видно, что наибольшие микротвердость и глубина наклепа поверхностного слоя упрочненных деталей получены при реверсивном выглаживании. По сравнению с об-

**Микроструктура и микротвердость поверхностного слоя упрочненных деталей  
в интенсивно деформированном слое при разных схемах нагружения**

Схема нагружения	Средний размер зерен, мкм	Средняя микротвердость, HV	Микроструктура
Без нагружения (неупрочненный слой)	~ 41,5	~ 200	
Вращение ролика относительно оси $x-x$ (глубина 90...100 мкм)	~ 12,7	~ 280	
Вращение ролика относительно оси $r$ (глубина 110...120 мкм)	~ 8,4	~ 350	
Реверсивное вращение ролика относительно оси $r$ (глубина 140...150 мкм)	~ 1,4	~ 470	

каткой по схемам, приведенным на рис. 1, а и б, после реверсивного выглаживания микротвердость поверхностного слоя деталей повышается на 40,4 и 25,5 %, а глубина наклепа — на 18,2 и 6,1 %, соответственно.

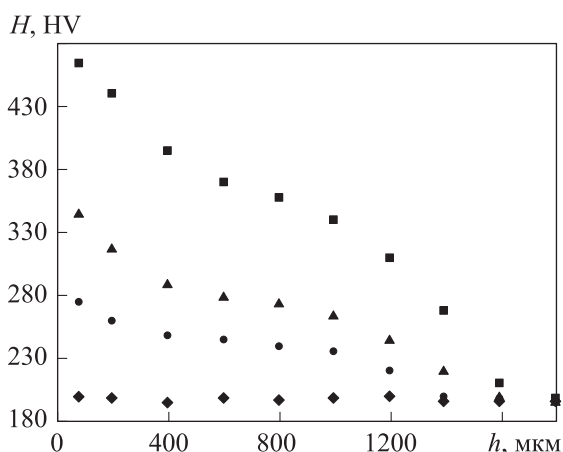


Рис. 3. Распределение микротвердости  $H$  по глубине поверхностного слоя  $h$  без обработки (◆) и после обкатки тороидальным роликом по разным схемам нагружения:

- — вращение ролика относительно оси  $x-x$ ;
- ▲ и ■ — круговое и реверсивное вращение ролика относительно оси  $r$  соответственно

Экспериментальными результатами установлено, что среди выбранных схем нагружения реверсивное выглаживание в большей мере способствует повышению не только микротвердости, но и глубины наклепа поверхностного слоя цилиндрических деталей.

**Остаточные напряжения сжатия.** Зависимость максимальных ОНС поверхностного слоя от схемы нагружения РИ приведена на рис. 4. Для измерения ОНС на поверхности упрочненных деталей использован метод шумов Баркгаузена [22]. Методика экспериментальных исследований описана в работе [23].

Как видно из рис. 4, наиболее эффективный результат получен при использовании упрочнения по схеме с реверсивным вращением ролика относительно оси  $r$  (см. рис. 1, в). В этом случае максимальные ОНС в поверхностном слое более чем на 34,4 и 15,5 % превышают таковые, полученные при обкатке по схемам, показанным на рис. 1, а и б соответственно.

**Плотность дислокаций в упрочненном слое.** Состояние поверхностного слоя — основной фактор, влияющий на возникновение дефектов.

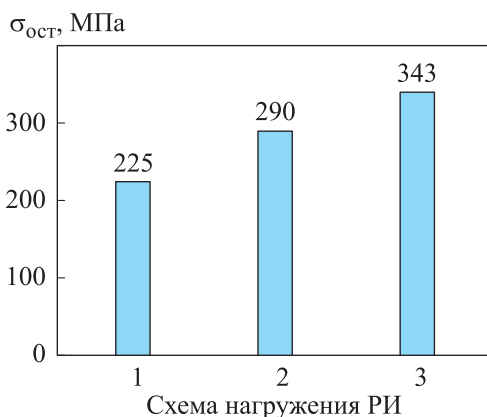


Рис. 4. Зависимость максимальных ОНС  $\sigma_{ост}$  в поверхностном слое от схемы нагружения РИ:

1 — вращение ролика относительно оси  $x-x$ ;  
2 и 3 — круговое и реверсивное вращение ролика относительно оси  $r$  соответственно

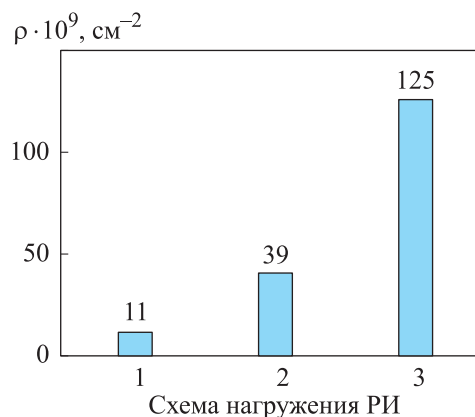


Рис. 5. Зависимость плотности дислокаций  $\rho$  от схемы нагружения РИ:

1 — вращение ролика относительно оси  $x-x$ ;  
2 и 3 — круговое и реверсивное вращение ролика относительно оси  $r$  соответственно

Природу пластической деформации при обработке ППД можно рассмотреть с точки зрения теории дислокаций, согласно которой деформация приводит к увеличению дефектов в кристаллической решетке металла, одновременно вызывая его упрочнение и подготавливая условия для разрушения.

Как свидетельствуют теоретические исследования, связь между напряжением течения  $\sigma$  и плотностью дислокаций  $\rho$  при относительно небольшой степени искаженности кристаллической решетки описывается соотношением [24]

$$\sigma = \sigma_0 + \alpha m G b \sqrt{\rho},$$

где  $\sigma_0$  — напряжение трения кристаллической решетки;  $\alpha$  — параметр междислокационного взаимодействия, находящийся в пределах 0,15...1,50 в зависимости от действующего механизма и типа кристаллической решетки материала;  $m$  — ориентационный множитель;  $G$  — модуль сдвига;  $b$  — вектор Бюргера дислокации.

Согласно исследованиям М.С. Дрозда [25],  $\sigma = 0,27 \text{ HV}$ . С учетом этого плотность дислокаций можно определить по формуле

$$\rho = [0,27(\text{HV} - \text{HV}_0)/\alpha m G b]^2 + \rho_0,$$

где  $\text{HV}$  — микротвердость на данной глубине;  $\text{HV}_0$  — микротвердость недеформированного материала;  $\alpha = 0,32$ ;  $m = 2,75$ ;  $G = 78 \text{ ГПа}$ ;  $b = 3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ ;  $\rho_0$  — начальная плотность дислокаций,  $\rho_0 = 1 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ .

Зависимость плотности дислокаций  $\rho$  на глубине 30 мкм от поверхности от схемы нагружения РИ показана на рис. 5. Видно, что

по сравнению с обкаткой по схемам, приведенным на рис. 1, а и б, реверсивное выглаживание (см. рис. 1, в) увеличивает плотность дислокаций в 11,4 и 3,2 раза соответственно.

Самым эффективным является реверсивное выглаживание, которое реализовано путем целенаправленных технологических воздействий на структуру металлов для увеличения плотности дислокаций и создания дислокационной субструктуры, повышающей сопротивление сдвигу. В результате внедрения РИ с реверсивным вращением металл поверхностного слоя детали при обработке находится в условиях сложного напряженного состояния, испытывает пластическую деформацию с накоплением большого числа искажений [18].

## Выводы

1. Выдвинутая гипотеза о влиянии кинематики РИ на качество поверхностного слоя деталей машин убедительно подтверждена.

2. По результатам экспериментальных исследований качества поверхностного слоя деталей машин после ППД установлено, что по сравнению с тороидальными роликами, совершающими вращение относительно центральной оси и круговое вращение относительно центральной оси, которая проходит через плоскость, соединяющую однорадиусные элементы, тороидальный ролик с реверсивным круговым движением имеет следующие преимущества:

- уменьшение параметра шероховатости  $Ra$  на 77,3 и 33,3 %;

- снижение параметра шероховатости  $R_z$  на 33,7 и 14,5 %;
- уменьшение размера зерен на 89,0 и 83,3 %;
- повышение микротвердости поверхностного слоя на 40,4 и 25,5 %;
- возрастание глубины наклепа на 18,2 и 6,1 %;
- увеличение максимальных ОНС в поверхностном слое на 34,4 и 15,5 %;
- повышение плотности дислокаций в 11,4 и 3,2 раза.

## Литература

- [1] Смелянский В.М. *Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием*. Москва, Машиностроение, 2002. 300 с.
- [2] Одинцов Л.Г. *Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием*. Москва, Машиностроение, 1987. 328 с.
- [3] Суслов А.Г. *Качество поверхностного слоя деталей машин*. Москва, Машиностроение, 2000. 320 с.
- [4] Ляшев Д.Н., Грушев В.В. Возможности повышения эксплуатационных характеристик восстанавливаемых деталей машин при финишной ультразвуковой обработке. *Механика XXI Веку*, 2010, № 9, с. 63–66.
- [5] Курицын В.Н., Панкратова Н.А., Кравченко И.Б. и др. Исследование влияния поверхностного пластического деформирования микрошариками на эксплуатационные характеристики деталей машин, работающих при высоких температурах. *Альманах современной науки и образования*, 2011, № 6, с. 76–79.
- [6] Саблин П.А., Щетинин В.С. Влияние микропрофиля обработанной поверхности на прочностные и эксплуатационные характеристики деталей машин. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2021, т. 17, № 8, с. 368–370.
- [7] Махалов М.С., Блюменштейн В.Ю. Механика процесса поверхностного пластического деформирования. Модель упрочняемого упругопластического тела. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*, 2018, № 4, с. 6–20, doi: <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2018-20.4-6-20>
- [8] Бутаков Б.И., Шебанин В.С., Марченко Д.Д. и др. Поверхностное пластическое деформирование как метод повышения качества деталей машин. *Труды Госнिति*, 2011, т. 107, № 2, с. 85–87.
- [9] Суслов А.Г., ред. *Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием*. Т. 1. Москва, Машиностроение, 2014. 478 с.
- [10] Отений Я.Н., Ольштынский Н.В., Ольштынский С.Н. и др. Особенности работы жесткого и упругого инструмента при обработке поверхностным пластическим деформированием роликами. *Известия Волгоградского государственного технического университета*, 2004, № 9, с. 34–35.
- [11] Зайдес С.А. От кинематики рабочего инструмента к новым процессам отделочно-упрочняющей обработки. *Вестник ИргТУ*, 2019, № 5, с. 863–873, doi: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-863-873>
- [12] Митрофанова К.С. Влияние поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом на структурно-фазовое состояние и микротвердость образцов из стали 45. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, 2022, № 3, с. 4–12, doi: <https://dx.doi.org/10.26730/1999-4125-2022-3-4-12>
- [13] Блюменштейн В.Ю., Митрофанова К.С. Рентгеноструктурные исследования поверхностного слоя армко-железа после обкатывания мультирадиусным роликом. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2022, т. 18, № 3, с. 110–115, doi: <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2022-18-3-110-115>
- [14] Довгалев А.М. Комбинированное магнитно-вибродинамическое накатывание поверхности отверстий нежестких деталей машин. *Вестник Белорусско-Российского университета*, 2015, № 4, с. 14–21, doi: [https://doi.org/10.53078/20778481\\_2015\\_4\\_14](https://doi.org/10.53078/20778481_2015_4_14)
- [15] Кропоткина Е.Ю. Управление качеством нежестких деталей методами поверхностного пластического деформирования. *Вестник МГТУ Станкин*, 2011, № 2, с. 25–28.
- [16] Зайдес С.А., ред. *Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования*. Т. 2. Иркутск, Изд-во ИРНИТУ, 2022. 584 с.

- [17] Алехин В.П. *Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов*. Москва, Наука, 1983. 280 с.
- [18] 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.
- [19] Зайдес С.А., Нгуен Х.Х. Влияние параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования на шероховатость упрочненных деталей. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2023, т. 19, № 1, с. 120–130, doi: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.19.1.018>
- [20] Хоанг Н.А., Нгуен Х.Х., Нгуен В.Х. Влияние параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования на механические свойства упрочненного слоя цилиндрических деталей. *Межд. науч.-тех. конф. Технологии и техника: Пути инновационного развития*. Воронеж, ВГТУ, 2023, с. 535–540.
- [21] Зайдес С.А., Нгуен Х.Х. Влияние реверсивного поверхностного пластического деформирования на изменение зеренной структуры углеродистой стали. *Черные металлы*, 2023, № 6, с. 61–70, doi: <https://doi.org/10.17580/chm.2023.06.09>
- [22] Никитина Е.Н. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин. *Вестник научно-технического развития*, 2010, № 4, с. 18–28.
- [23] Зайдес С.А., Нгуен Х.Х. Определение остаточных напряжений с использованием шумов Баркгаузена при реверсивном поверхностном пластическом деформировании. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*, 2023, т. 21, № 3, с. 51–61.
- [24] Приходько В.М., Петрова Л.Г., Чудина О.В. *Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий*. Москва, Машиностроение, 2003. 380 с.
- [25] Драпкин Б.М., Кононенко В.К., Безъязычный В.Ф. *Свойства сплавов в экстремальном состоянии*. Москва, Машиностроение, 2004. 256 с.

## References

- [1] Smelyanskiy V.M. *Mekhanika uprochneniya detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Mechanics of hardening of details by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 300 p. (In Russ.).
- [2] Odintsov L.G. *Uprochnenie i otdelka detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Strengthening and finishing of details by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 328 p. (In Russ.).
- [3] Suslov A.G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloya detaley mashin* [Quality of a surface layer of details of machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000. 320 p. (In Russ.).
- [4] Lyashev D.N., Grushev V.V. Possibilities of increase of operational characteristics of restored machine parts at finishing ultrasonic processing. *Mekhaniki XXI Veku*, 2010, no. 9, pp. 63–66. (In Russ.).
- [5] Kuritsyn V.N., Pankratova N.A., Kravchenko I.B. et al. Investigation of influence of surface plastic deformation by microballoons on operational characteristics of machine parts working at high temperatures. *Almanakh sovremennoy nauki i obrazovaniya*, 2011, no. 6, pp. 76–79. (In Russ.).
- [6] Sablin P.A., Shchetinin V.S. Influence of the micro profile of the treated surface on the strength and performance characteristics of machine parts. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2021, vol. 17, no. 8, pp. 368–370. (In Russ.).
- [7] Makhlov M.S., Blyumenshteyn V.Yu. Surface plastic deformation mechanics. the hardenable elastic-plastic body model. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal Working and Material Science], 2018, no. 4, pp. 6–20, doi: <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2018-20.4-6-20> (in Russ.).
- [8] Butakov B.I., Shebanin V.S., Marchenko D.D. et al. Surface plastic deformation as a method of improving the quality of machine parts. *Trudy Gosniti*, 2011, vol. 107, no. 2, pp. 85–87. (In Russ.).



- [9] Suslov A.G., ed. *Tekhnologiya i instrumenty otdelochno-uprochnyayushchey obrabotki detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem*. T. 1 [Technology and tools of finishing and strengthening machining of parts by surface plastic deformation. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2014. 478 p. (In Russ.).
- [10] Oteniy Ya.N., Olshtynskiy N.V., Olshtynskiy S.N. et al. Features of work of rigid and elastic tools during machining by surface plastic deformation with rollers. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Izvestia Volgograd State Technical University], 2004, no. 9, pp. 34–35. (In Russ.).
- [11] Zaydes S.A. From working tool kinematics to new finishing-hardening processes. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2019, no. 5, pp. 863–873, doi: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-863-873> (in Russ.).
- [12] Mitrofanova K.S. The effect of surface plastic deformation by a multiradius roller on the structural-phase state and microhardness of steel 45 samples. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kuzbass State Technical University], 2022, no. 3, pp. 4–12, doi: <https://dx.doi.org/10.26730/1999-4125-2022-3-4-12> (in Russ.).
- [13] Blyumenshteyn V.Yu., Mitrofanova K.S. X-ray structural studies of the surface layer of pure iron after rolling with a multiradius roller. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2022, vol. 18, no. 3, pp. 110–115, doi: <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2022-18-3-110-115> (in Russ.).
- [14] Dovgalev A.M. Combined magnetic-vibrodynamics roll forming of the surface of openings in non-rigid machine components. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*, 2015, no. 4, pp. 14–21, doi: [https://doi.org/10.53078/20778481\\_2015\\_4\\_14](https://doi.org/10.53078/20778481_2015_4_14) (in Russ.).
- [15] Kropotkina E.Yu. Quality management of non-rigid parts by surface plastic deformation methods. *Vestnik MGTU Stankin* [Vestnik MSUT Stankin], 2011, no. 2, pp. 25–28. (In Russ.).
- [16] Zaydes S.A., ed. *Spravochnik po protsessam poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya*. T. 2 [Handbook on processes surface plastic deformation Vol. 2]. Irkutsk, Izd-vo IRNITU Publ., 2022. 584 p. (In Russ.).
- [17] Alekhin V.P. *Fizika prochnosti i plastichnosti poverkhnostnykh sloev materialov* [Physics of strength and plasticity of surface layers of materials]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 280 p. (In Russ.).
- [18] 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.).
- [19] Zaydes S.A., Nguen Kh.Kh. Influence of parameters of reversible surface plastic deformation on the hardened parts roughness. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh state technical university], 2023, vol. 19, no. 1, pp. 120–130, doi: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.19.1.018> (in Russ.).
- [20] Khoang N.A., Nguen Kh.Kh., Nguen V.Kh. [Influence of parameters of reversible surface plastic deformation on the mechanical properties of a hardened layer of cylindrical parts]. *Mezhd. nauch.-tekhn. konf. Tekhnologii i tekhnika: Puti innovatsionnogo razvitiya* [Int. Sci.-Tech. Conf. Technologies and Technics: Ways of Innovative Development]. Voronezh, VGTU Publ., 2023, pp. 535–540. (In Russ.).
- [21] Zaydes S.A., Nguen Kh.Kh. Influence of reversible surface plastic deformation on changes in the grain structure of carbon steel stali. *Chernye metally*, 2023, no. 6, pp. 61–70, doi: <https://doi.org/10.17580/chm.2023.06.09> (in Russ.).
- [22] Nikitina E.N. Advantages of the acoustoelasticity method for non-destructive testing of mechanical stresses in machine parts. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2010, no. 4, pp. 18–28. (In Russ.).
- [23] Zaydes S.A., Nguen Kh.Kh. Determination of residual stresses by using barkhausen noise in the reverse surface plastic deformation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2023, vol. 21, no. 3, pp. 51–61. (In Russ.).

- [24] Prikhodko V.M., Petrova L.G., Chudina O.V. *Metallofizicheskie osnovy razrabotki uprochnyayushchikh tekhnologiy* [Metallophysical bases of development of hardening technologies]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 380 p. (In Russ.).
- [25] Drapkin B.M., Kononenko V.K., Bezyazychnyy V.F. *Svoystva splavov v ekstremalnom sostoyanii* [Properties of alloys in the extreme state]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 256 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 14.11.2023

## 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 рабочего инструмента на качество деталей машин при поверхностном пластическом деформировании. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 6, с. 66–75.

### Please cite this article in English as:

Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. Working tool kinematics influence on the machine parts quality at the plastic deformation. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 6, pp. 66–75.