

УДК 621.7.011

DOI 10.18698/0536-1044-2018-2-58-67

# Влияние новой кинематики обкатного ролика на качество упрочненного слоя при поверхностном пластическом деформировании

С.А. Зайдес, Као Кыонг Нго

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83

## The Influence of New Kinematics of the Rolling Roller on the Quality of the Hardened Layer Under Surface Plastic Deformation

S.A. Zaides, Ngo Cao Cuong

Irkutsk National Research Technical University, 664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83

@ e-mail: zsa@istu.edu, cuong.istu@gmail.com

**i** Рассмотрен новый способ поверхностного пластического деформирования наружных цилиндрических поверхностей деталей машин, где деформирующий элемент инструмента является индентором с двумя рабочими профильными радиусами, и инструменту дополнительно сообщают вращательное движение относительно оси, проходящей через плоскость, соединяющую два ролика, и перпендикулярно к оси заготовки. Изучено влияние кинематики деформирования на характеристики качества поверхностного слоя упрочненных деталей: шероховатость, остаточные напряжения, глубину наклепа, твердость и микротвердость. Выявлена эффективность упрочнения деталей при обкатывании двухрадиусным роликом по сравнению с деформированием однорадиусным роликом.

**Ключевые слова:** двухрадиусный ролик, деформационное упрочнение, поверхностное пластическое деформирование, качество поверхностного слоя, шероховатость, твердость, остаточные напряжения

**i** A new method of surface plastic deformation of the outer cylindrical surfaces of machine parts is considered. In this method, the deforming element of the tool is an indenter with two working profile radii, and an additional rotary motion is imparted to the tool about the axis passing through the plane connecting the two rolls and perpendicular to the axis of the workpiece. The influence of the kinematics of deformation on the quality characteristics of the surface layer of the hardened parts is studied: roughness, residual stresses, depth of hardening, hardness and microhardness. The efficiency of hardening by a two-radial roller compared to the deformation by a single-radial roller is established.

**Keywords:** two-radial roller, deformation hardening, surface plastic deformation, surface layer quality, roughness, hardness, residual stresses

Для повышения долговечности различных деталей в промышленности широко применяют технологии поверхностного пластического деформирования (ППД). Отделочно-упрочня-

ющие методы обработки ППД просты в реализации, экономичны, производительны, обеспечивают формирование низкой шероховатости, заданной глубины и степени упрочнения, оста-

точных напряжений сжатия в поверхностных слоях, мелкозернистой структуры и других показателей качества поверхностного слоя обработанных деталей [1–5].

Традиционно ППД осуществляется локальным деформирующим инструментом (шариком, роликом, диском, алмазным индентором и др.). Пластическое локальное воздействие позволяет выполнять отделочно-упрочняющую обработку разнообразных деталей сложных и простых форм.

Однако технологию, разработанную для обработки ППД жестких валов (большого диаметра и малой длины), иногда нельзя использовать для обработки маложестких валов без существенного увеличения жесткости технологической системы, создания специальных инструментов и оборудования. При пластическом деформировании деталей малой жесткости (тонкостенных, длинномерных деталей) возможности локальных методов упрочнения ограничены. Это связано с малой изгибной жесткостью заготовки, вибрациями в механической системе, сложностью достижения заданного качества изделия, точности и производительности обработки, а также с отсутствием необходимого технологического оборудования. Пластическая деформация даже только поверхностного слоя вызывает значительные деформации и перемещения частиц металла, что отрицательно сказывается на геометрии изделия [6].

Вопросы интенсификации напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при ППД рассмотрены в работах [7–9]. При этом установлена существенная эффективность предложенных решений. Однако оценка качества упрочненного слоя осталась под вопросом.

Цель работы — исследование качества упрочненного слоя при использовании новой технологической схемы ППД и сравнение экспериментальных результатов с данными, полученными при обработке деталей обычным цилиндрическим однорадиусным роликом.

**Физические особенности деформационного упрочнения.** Согласно современной дислокационной теории, основные механизмы упрочнения, обеспечивающие повышение напряжения пластического течения, можно классифицировать на основе геометрических размеров «препятствий», тормозящих движение дислокаций (элементами субструктуры, границами зерен, растворенными атомами, дислокациями,

дисперсными частицами) [10, 11]. Наиболее эффективное упрочнение сталей и сплавов может быть реализовано путем целенаправленных технологических воздействий на структуру металлов для повышения плотности дислокаций и создания дислокационной субструктуры для увеличения сопротивления сдвига упрочняемого материала.

Таким образом, пути повышения прочностных свойств сплавов и сталей заключаются в разработке упрочняющих технологий, обеспечивающих формирование такого структурного состояния материала, при котором максимально реализуются основные принципы дислокационной теории упрочнения. Интенсификация напряженного состояния может быть достигнута, если будет усилено деформационное искажение зерен материала. Отсюда вытекает технологическая задача: необходимо создать такую конструкцию и кинематику рабочего локального инструмента, которые бы усиливали при ППД искажение структуры материала при сохранении качества поверхностного слоя.

#### **Конструкция локального инструмента.**

В практике ППД известно и широко используют локальные упрочняющие методы обкатки деталей цилиндрическим роликом. Процесс локального пластического деформирования представлен цилиндрическим роликом, вращающимся относительно горизонтальной оси. Перемещаясь в осевом направлении по поверхности вращающегося цилиндрического образца, деформирующий ролик создает винтовую траекторию пластического следа на обрабатываемой поверхности. С точки зрения деформационного искажения микроструктуры этот процесс является малоэффективным.

Техническая идея по интенсификации напряженного состояния в очаге деформации заключается в изменении кинематики рабочего инструмента, которая должна усиливать искажение зеренной структуры материала. В предлагаемом способе ППД наружных цилиндрических поверхностей деталей машин деформирующий элемент инструмента является индентором с двумя рабочими профильными радиусами. При этом инструменту дополнительно сообщают вращательное движение относительно оси, проходящей через плоскость, соединяющей два ролика, и перпендикулярно к оси заготовки.

При вращении ролика вокруг диаметральной оси происходит наложение пластических

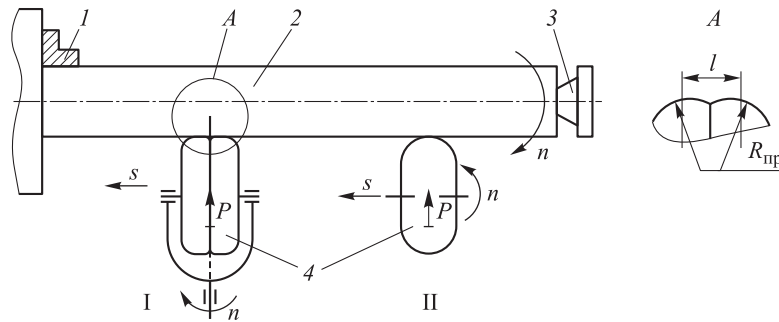


Рис. 1. Схемы упрочняющей обработки двухрадиусным (I) и однорадиусным роликом (II) на токарном станке (а) и вид рабочей части двухрадиусного ролика (б): 1 — трехкулачковый патрон; 2 — заготовка; 3 — задняя бабка; 4 — инструмент

полей разных по направлению ориентаций, что должно способствовать искажению, «перемешиванию» структуры в поверхностном слое и повышению эффективности упрочняющей обработки. На рис. 1 приведена схема реализации данного способа ППД.

#### Методика экспериментальных исследований.

Исследования проведены на цилиндрических образцах диаметром 18 мм, изготовленных из стали 45 на токарном станке 1К62. Для локального упрочнения использован однорадиусный цилиндрический ролик из стали У10А, диаметром 30 мм с профильным радиусом  $R_{пр} = 5$  мм. В качестве технологической смазки применено масло И-40А. Режимы обработки: подача  $s = 0,21$  мм/об, глубина внедрения ролика (натяг) 0,1 мм, частота вращения заготовки  $n = 125$  мин<sup>-1</sup>.

Обкатывание двухрадиусным роликом выполнено на токарном обрабатывающем центре DMG NEF400 (Германия) с глубиной внедрения, также равной 0,1 мм. Режимы обработки: подача  $s = 0,21$  мм/об, частоты вращения заготовки  $n_z = 125$  мин<sup>-1</sup> и инструмента  $n_{и} = 1\,200$  мин<sup>-1</sup>. Смазка — масло И-40А. Двухрадиусный ролик выполнен из стали У10А с профильным радиусом  $R_{пр} = 3$  мм, расстояние  $l = 2$  мм (см. рис. 1, б).

Двухрадиусный ролик можно использовать и для упрочнения деталей на обычных токарных станках. Для этого потребуется достаточно простое приспособление, состоящее из трехфазного электродвигателя мощностью 1...1,5 кВт с регулируемой частотой вращения. На валу электродвигателя закрепляется трехкулачковый патрон, в который вставляется хвостовик двухрадиусного инструмента. Приспособление устанавливается вместо резцедержателя на суппорте токарного станка.

Измерение параметров шероховатости после упрочнения ППД проводили с помощью профилографа-профилометра Form Talysurf i200 производства фирмы Taylor Hobson (Англия) с применением индуктивного и лазерного интерферометрического датчиков. Прибор способен измерять отклонения формы в пределах ограниченной поверхности, волнистость, направления неровностей, изъяны поверхности, а также параметры шероховатости, в том числе соответствующие ГОСТ 2789–73.

С помощью твердомера HBRV-187,5 получена поверхностная твердость по Роквеллу стальным шариком диаметром 1,588 мм (HRB). Твердость по Роквеллу определена по глубине вдавливания наконечника. Вдавливание проводили под действием двух последовательно приложенных нагрузок — предварительной и окончательной (общей), равных соответственно 100 и 980 Н. Твердость находили по разности глубин вдавливания отпечатков. Глубина отпечатка под действием основной нагрузки фиксировалась индикатором, а твердость по HRB после измерения отсчитывалась на экране твердомера.

Для определения микротвердости использовали микротвердомер ПМТ-3 с усилием нагружения 200 г. При испытании измеряли диагональ отпечатка  $d$  и по соответствующим таблицам (для заданной нагрузки  $P$ ) получали микротвердость  $H_{\mu}$  (Н/мм<sup>2</sup>).

Для измерения остаточных напряжений применяли прибор Xstress 3000 G3/G3R. Режим измерения: хромовый анод, К-α излучение, напряжение на рентгеновской трубке — 25кВ, ток — 5,5 мА. Использовали оба детектора, коллиматор — 5 мм. Угол дифракции — 156,4°. Плоскость отражения (311). Количество наклонов — 8, отклонение наклона (осцилляция) ±5°.

Время экспозиции — 5 с. Измерение напряжений проводили в двух направлениях ( $\varphi$ ):  $0^\circ$  (положение гониометра вдоль образца) и  $90^\circ$  (положение гониометра поперек образца). Определяли нормальные напряжения одним из стандартных способов обсчета пиков Peakfit, предлагаемым программным обеспечением прибора. Для автоматизированного расчета напряжений вводили параметры материала: модуль Юнга — 210 ГПа; коэффициент Пуассона — 0,3.

Исследование микроструктуры металла выполняли на металлографическом микроскопе MET-2, предназначенном для визуального наблюдения микроструктуры металлов, сплавов и других непрозрачных объектов в отраженном свете при прямом освещении в светлом поле, а также для исследования объектов в поляризованном свете. Образцы подготавливали и заливали в формы на прессе Полиаб С50А с последующим шлифованием наждачной бумагой различной зернистости, травлением спиртом и 5%-ной азотной кислотой. С помощью программы Topr View была сфотографирована структура металла.

**Результаты эксперимента.** Далее показано влияние рассмотренных схем упрочнения на основные характеристики качества поверхностного слоя: шероховатость, поверхностную твердость, остаточные напряжения, микроструктуру и глубину наклепа.

**Шероховатость.** Профилограммы шероховатости при обкатке двух- и однорядиусным роликами приведены на рис. 2, где видно, что высота и степень заполнения впадин микронеровностей имеют лучше результаты при обработке двухрадиусным роликом. На рис. 3 показаны зависимости параметров шероховатости от схемы обработки. Перед упрочнением образцы имели следующие исходные значения параметров шероховатости:  $Ra_{исх} = 1,7$  мкм,

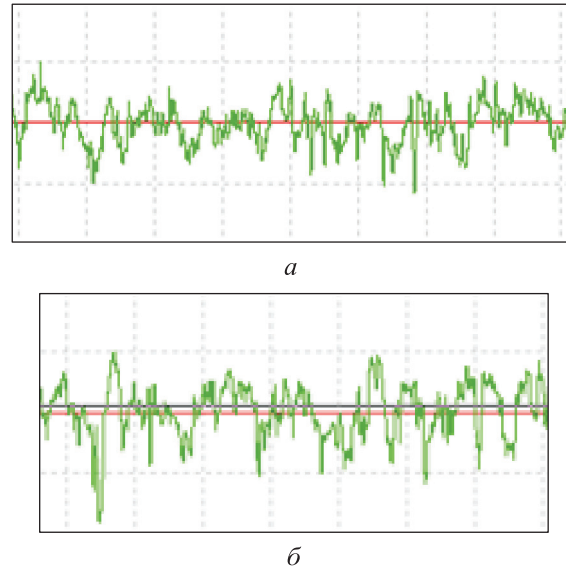


Рис. 2. Профилограммы шероховатости при обкатке двухрадиусным (а) и однорядиусным (б) роликами

$Rz_{исх} = 13$  мкм. После обкатки однорядиусным роликом  $Rz$  и  $Ra$  снижаются соответственно в 2 и 2,2 раза, а при обработке двухрадиусным роликом — в 2,9 и 3,5 раза.

На рис. 4 показано влияние режимов обработки на параметр шероховатости  $Ra$ . При малых значениях натяга искажение микропрофиля небольшое, микронеровности деформируются не полностью. Из рис. 4, а видно, что с увеличением натяга шероховатость поверхности уменьшается до определенного значения. Дальнейшее повышение натяга ( $t > 0,2$  мм) приводит к росту шероховатости, что является результатом увеличения пластических искажений и формирования при этом микротрещин, вызывающих разрушение поверхностных слоев вследствие перенаклепа.

Влияние подачи на параметр шероховатости  $Ra$  показано на рис. 4, б. При малых подачах степень перекрытия очагов деформации наибольшая, что позволяет достичь минималь-

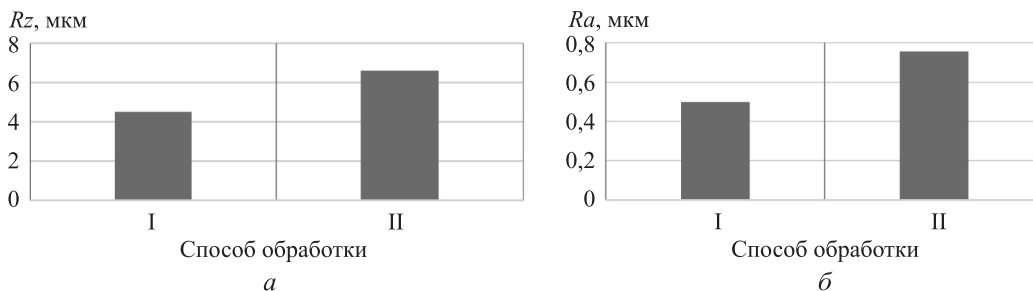


Рис. 3. Зависимости параметров шероховатости  $Rz$  (а) и  $Ra$  (б) от способа обработки: I и II — обкатка двух- и однорядиусным роликом

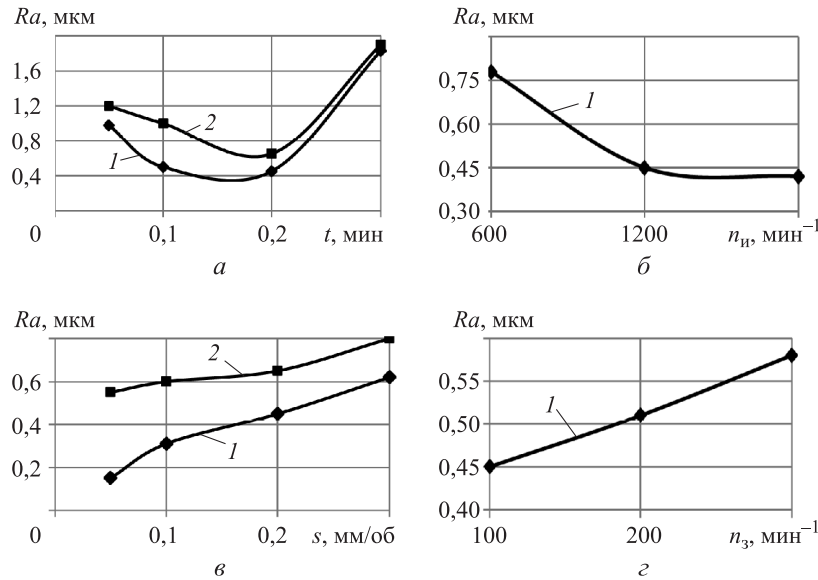


Рис. 4. Влияние режимов обработки двухрадиусным (1) и однорадиусным (2) роликами на параметр шероховатости  $Ra$  при исходной шероховатости заготовки  $Ra_{исх} = 1,69$  (слева) и  $1,7$  мкм (справа):

*a* — натяга  $t$  (1 —  $n_s = 125$  мин<sup>-1</sup>,  $n_n = 1\ 200$  мин<sup>-1</sup>,  $s = 0,21$  мм/об; 2 —  $n_s = 125$  мин<sup>-1</sup>,  $s = 0,21$  мм/об);

*б* — частоты вращения инструмента  $n_n$  ( $n_s = 125$  мин<sup>-1</sup>,  $t = 0,2$  мм,  $s = 0,21$  мм/об);

*в* — подачи  $s$  (1 —  $n_s = 125$  мин<sup>-1</sup>,  $n_n = 1\ 200$  мин<sup>-1</sup>,  $t = 0,2$  мм; 2 —  $n_s = 125$  мин<sup>-1</sup>,  $t = 0,2$  мм);

*г* — частоты вращения заготовки  $n_s$  ( $t = 0,2$  мм,  $s = 0,21$  мм/об,  $n_n = 1\ 200$  мин<sup>-1</sup>)

ной высоты микронеровностей. С увеличением подачи степень перекрытия очагов деформации уменьшается — шероховатость растет, что способствует образованию полностью нового профиля поверхности [12]. При обработке однорадиусным роликом параметр шероховатости  $Ra$  снижается в 3,1 раза, а при обкатке двухрадиусным инструментом — в 11 раз.

Шероховатость поверхности снижается монотонно с увеличением частоты вращения инструмента (рис. 4, б). После упрочнения параметры шероховатости  $Rz$  и  $Ra$  снизились в 4–4,3 раза по сравнению с исходной шероховатостью заготовки. При повышении скорости вращения заготовки шероховатость поверхности несколько возрастает (рис. 4, г). Это объясняется тем, что при малых скоростях обкатывания происходит более полное смятие неровностей. Пластическая деформация преобладает над упругой вследствие того, что воздействие ролика на единицу площади при малых скоростях обкатывания более продолжительное. С увеличением скорости время воздействия ролика на поверхностный слой уменьшается, упругая деформация преобладает над пластической. Возрастание пластической деформации отстает от роста скорости приложения нагрузки. Однако повышение скорости обработки оказывает незначительное влияние на шероховатость поверхности.

**Поверхностная твердость.** На рис. 5 приведена зависимость поверхностной твердости от способа обработки. При обкатке двухрадиусным роликом поверхностный слой деформируется многократно и в большей мере, чем при обкатке однорадиусным роликом. В результате твердость увеличивается соответственно на 9,4 и 3,5 % по сравнению с исходной твердостью ( $HRB_{исх} = 85$ ).

На рис. 6 показано влияние натяга и подачи двух- и однорадиусного роликов на поверхностную твердость. Из рисунка видно, что твердость деталей при обработке двухрадиусным роликом может быть повышена на 21 %, а при обкатке однорадиусным роликом — на 12 % по сравнению с исходной твердостью ( $HRB_{исх} = 85$ ). Уменьшение твердости поверхности с увеличением подачи можно объяснить

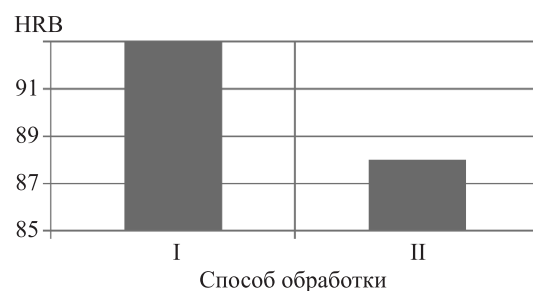


Рис. 5. Зависимость поверхностной твердости  $HRB$  от способа обработки:

I и II — обкатка двух- и однорадиусным роликом

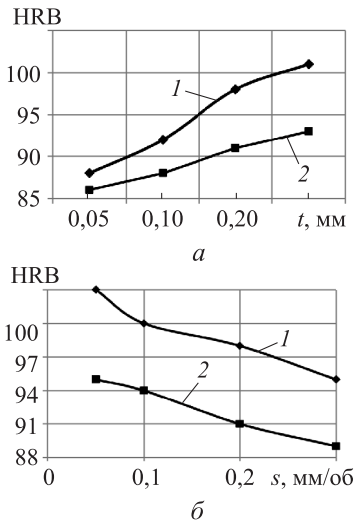


Рис. 6. Влияние режимов обработки двухрадиусным (1) и однорадиусным (2) роликами на поверхностную твердость HRB:  
 а — натяга  $t$  (1 —  $n_3 = 125 \text{ мин}^{-1}$ ,  $n_n = 1 200 \text{ мин}^{-1}$ ,  $s = 0,21 \text{ мм/об}$ ; 2 —  $n_3 = 125 \text{ мин}^{-1}$ ,  $s = 0,21 \text{ мм/об}$ );  
 б — подачи  $s$  (1 —  $n_3 = 125 \text{ мин}^{-1}$ ,  $n_n = 1 200 \text{ мин}^{-1}$ ,  $t = 0,2 \text{ мм}$ ; 2 —  $n_3 = 125 \text{ мин}^{-1}$ ,  $t = 0,2 \text{ мм}$ )

снижением кратности приложения нагрузки на обрабатываемую зону образца.

**Остаточные напряжения.** Результаты измерения остаточных напряжений рентгеновским способом показаны на рис. 7, из которого видно, что осевые остаточные напряжения  $\sigma_z^{\text{ост}}$

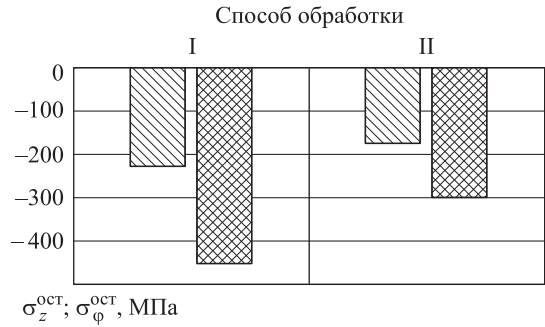


Рис. 7. Зависимость осевых  $\sigma_z^{\text{ост}}$  и тангенциальных  $\sigma_\phi^{\text{ост}}$  остаточных напряжений от способа обработки: I и II — обкатка двух- и однорадиусным роликом

больше, чем тангенциальные остаточные  $\sigma_\phi^{\text{ост}}$ . При обкатке двух- и однорадиусным роликами в поверхностных слоях формируются остаточные напряжения сжатия. При этом отношение осевых и тангенциальных напряжений составляет 1,7...2, что согласуется с данными работ [13–15]. При обкатке двухрадиусным роликом значения поверхностных остаточных напряжений в 1,2–1,5 раза выше, чем при обработке однорадиусным роликом.

На рис. 8 показано влияние режимов обработки двух- и однорадиусным роликами на поверхностные остаточные напряжения сжатия.

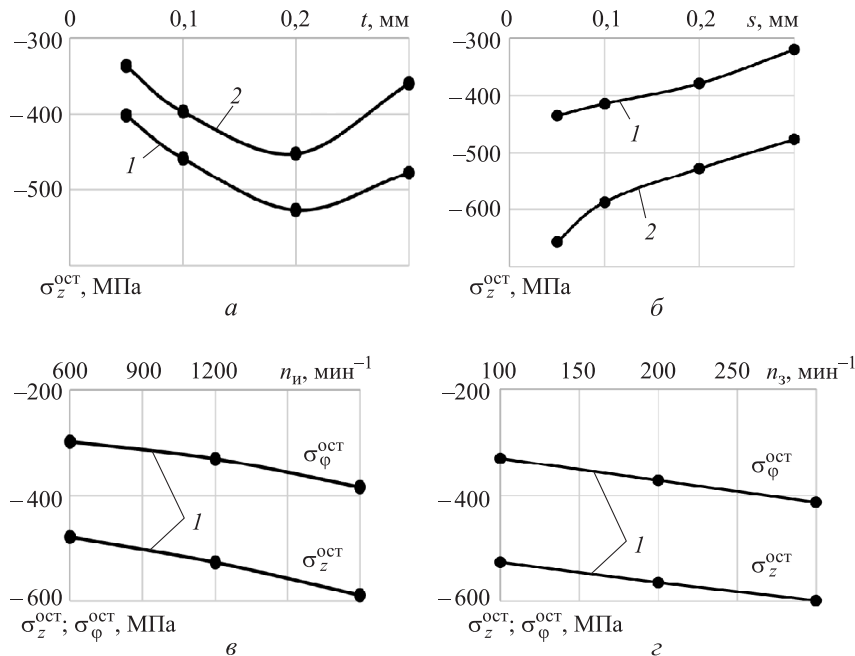
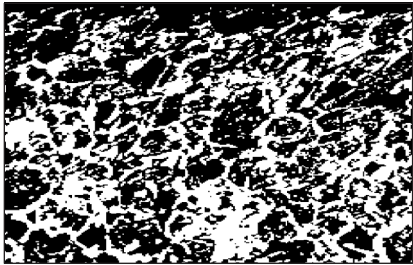
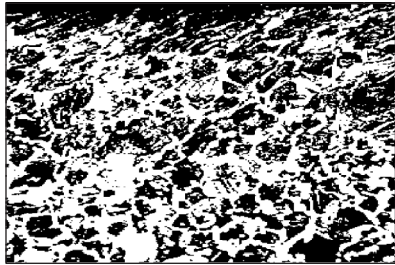
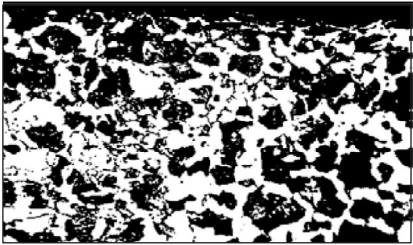
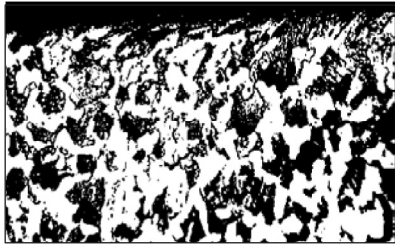


Рис. 8. Влияние режимов обработки двухрадиусным (1) и однорадиусным роликами (2) на поверхностные остаточные напряжения сжатия:  
 а — натяга  $t$  (1 —  $n_3 = 125 \text{ мин}^{-1}$ ,  $n_n = 1 200 \text{ мин}^{-1}$ ,  $s = 0,21 \text{ мм/об}$ ; 2 —  $n_3 = 125 \text{ мин}^{-1}$ ,  $s = 0,21 \text{ мм/об}$ );  
 б — подачи  $s$  (1 —  $n_3 = 125 \text{ мин}^{-1}$ ,  $n_n = 1 200 \text{ мин}^{-1}$ ,  $t = 0,2 \text{ мм}$ ; 2 —  $n_3 = 125 \text{ мин}^{-1}$ ,  $t = 0,2 \text{ мм}$ );  
 в — частоты вращения инструмента  $n_n$  ( $n_3 = 125 \text{ мин}^{-1}$ ,  $t = 0,2 \text{ мм}$ ,  $s = 0,21 \text{ мм/об}$ );  
 з — частоты вращения заготовки  $n_3$  ( $n_n = 1 200 \text{ мин}^{-1}$ ,  $t = 0,2 \text{ мм}$ ,  $s = 0,21 \text{ мм/об}$ )

### Микроструктура упрочненных образцов после обработки (увеличение $\times 1000$ )

Способ обработки	Сечение образца	
	поперечное	продольное
Обкатка двухрадиусным роликом		
Обкатка однорадиусным роликом		

Обкатывание с большими натягами, превышающими их оптимальное значение, вследствие перенаклепа в локальных объемах приводит к снижению остаточных напряжений упрочненного слоя.

Увеличение подачи в результате уменьшения числа повторных деформаций приводит к снижению остаточных напряжений. Повышение скорости обкатывания приводит к росту сопротивления металлов деформированию, что объясняется резким возрастанием скорости перемещения дислокаций, вызывающим, в свою очередь, увеличение сопротивления кристаллической решетки этому перемещению [16].

**Микроструктура.** Фотографии микроструктуры на краю упрочненной зоны после

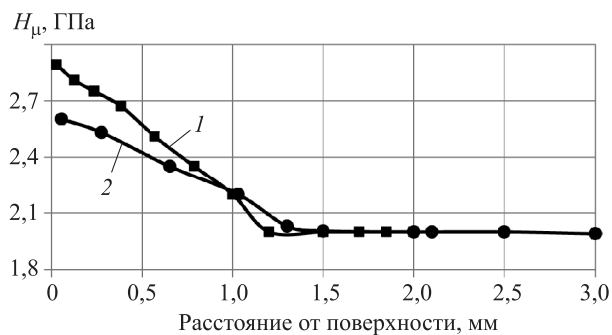


Рис. 9. Распределение микротвердости по поперечному сечению образцов при обкатке двухрадиусным (1) и однорадиусным (2) роликами

обработки представлены в таблице, где черные зерна — перлит, белые — феррит.

Рассмотренные способы упрочнения влияют на изменение микроструктуры в поверхностном слое. После обработки ППД зерна вытягиваются в продольном сечении интенсивнее, чем в поперечном направлении. При этом наблюдается измельчение зерен, разрушение их границ и образование текстуры. Исходная структура с зернами средних размеров составляла 22 мкм. При обкатке двухрадиусным роликом размеры зерен уменьшаются в продольном и поперечном направлениях соответственно на 78,5 и 64,6 %, а при обработке однорадиусным роликом — на 65,7 и 46 %.

**Микротвердость и глубина наклепа.** На рис. 9 показано распределение микротвердости по поперечному сечению образцов в зависимости от способов упрочнения.

Локальный процесс упрочнения двухрадиусным роликом по сравнению с обкаткой однорадиусным роликом позволяет получить больший градиент изменения и значение микротвердости, но несколько меньшую глубину пластической зоны.

По результатам экспериментальных исследований выявлено, что качество поверхностного слоя существенно зависит от кинематики ППД. Выбор способа ППД и назначение режимов обработки необходимо осуществлять в зависимости от технических требований к поверхностным слоям деталей.

## Выводы

1. В результате экспериментальных исследований установлено, что ППД двухрадиусным роликом по сравнению с однорадиусным имеет ряд преимуществ в отношении качества упрочненного слоя. Так, шероховатость поверхности снижается в 3–3,5 раза, твердость поверхностного слоя повышается на 6...8 %, остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое возрастают в 1,2–1,5 раза. Следует отметить, что при упрочнении двухрадиусным роликом глубина наклепанного слоя несколько ниже.

2. Наиболее существенное влияние на микрогеометрию поверхности при обкатывании двухрадиусным роликом оказывают натяг и продольная подача инструмента, менее значи-

тельное — частоты вращения инструмента и детали. При этом параметры шероховатости снижаются в 11 раз, а поверхностная твердость деталей повышается на 21 % по сравнению с таковой для исходной заготовки. При обработке обычным однорадиусным роликом параметр шероховатости  $Ra$  уменьшается в 3,1 раза, а поверхностная твердость деталей увеличивается на 12 %.

3. Результаты экспериментальных исследований позволяют выбрать способ упрочнения для получения заданных характеристик качества поверхностного слоя деталей машин. Полученные результаты дают основание для разработки комбинированных способов ППД, обеспечивающих получение высокого качества поверхностного слоя по ряду показателей.

## Литература

- [1] Одинцов Л.Г. *Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. Справочник*. Москва, Машиностроение, 1987. 328 с.
- [2] Папшев Д.Д. *Упрочнение деталей обкаткой шариком*. Москва, Машиностроение, 1968. 132 с.
- [3] Суслов А.Г., ред. *Инженерия поверхности деталей*. Москва, Машиностроение, 2008. 320 с.
- [4] Суслов А.Г. *Качество поверхностного слоя деталей машин*. Москва, Машиностроение, 2000. 320 с.
- [5] Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. *Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин*. Москва, Машиностроение, 2007. 399 с.
- [6] Зайдес С.А., ред. *Деформирующая обработка валов*. Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 2013. 452 с.
- [7] Зайдес С.А., Нго К.К. Новые технологические возможности отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием. *Научно-технические технологии в машиностроении*, 2017, № 3, с. 25–30.
- [8] Зайдес С.А., Нго К.К. Технологическая интенсификация напряженного состояния в стесненных условиях локального нагружения. *Вестник машиностроения*, 2017, № 3, с. 5–8.
- [9] Зайдес С.А., Нго К.К. Оценка напряженного состояния при стесненных условиях локального нагружения. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2016, № 10, с. 6–9.
- [10] Драпкин Б.М., Кононенко В.К., Безъязычный В.Ф. *Свойства сплавов в экстремальном состоянии*. Москва, Машиностроение, 2004. 256 с.
- [11] Приходько В.М., Петрова Л.Г., Чудина О.В. *Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий*. Москва, Машиностроение, 2003. 384 с.
- [12] Смелянский В.М. *Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием*. Москва, Машиностроение, 2002. 300 с.
- [13] Киричек А.В., ред. *Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки*. Москва, Издательский дом «Спектр», 2014. 403 с.
- [14] Махалов М.С. Расчетные модели остаточных напряжений поверхностного слоя после упрочнения способами поверхностного пластического деформирования. *Обработка металлов*, 2012, № 3, с. 110–115.
- [15] Суслов А.Г., ред. *Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник*. В 2 т. Т. 1. Москва, Машиностроение, 2014. 480 с.
- [16] Копылов Ю.Р. *Динамика процессов виброударного упрочнения*. Воронеж, Научная книга, 2011. 569 с.



## References

- [1] Odintsov L.G. *Uprochnenie i otdelka detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem. Spravochnik* [Hardening and finishing details by surface plastic deformation. Reference]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1987. 328 p.
- [2] Papshev D.D. *Uprochnenie detalei obkatkoi sharikom* [Strengthening of parts by running balls]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1968. 132 p.
- [3] Suslov A.G., Bez"iazychnyi V.F., Panfilov Iu.V. i dr. *Inzheneriia poverkhnosti detalei* [Surface engineering of parts]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2008. 320 p.
- [4] Suslov A.G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloia detalei mashin* [The quality of surface layer of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2000. 320 p.
- [5] Bliumenshtein V.Iu., Smelianskii V.M. *Mekhanika tekhnologicheskogo nasledovaniia na stadiakh obrabotki i ekspluatatsii detalei mashin* [Mechanics of technological inheritance on the stages of processing and exploitation of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2007. 399 p.
- [6] *Deformiruiushchaia obrabotka valov* [Deforming shaft machining]. Ed. Zaides S.A. Irkutsk, IrSTU publ., 2013. 452 p.
- [7] Zaides S.A., Ngo K.K. Novye tekhnologicheskie vozmozhnosti otdelchno-uprochniaiushchei obrabotki poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem [New technological potentialities of finish-strengthening by surface plastic deformation]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering]. 2017, no. 3, pp. 25–30.
- [8] Zaides S.A., Ngo K.K. Tekhnologicheskaiia intensifikatsiia napriazhennogo sostoiianiia v stesnennykh usloviakh lokal'nogo nagruzheniia [Technological intensification of stressed state in constrained conditions of local loading]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2017, no. 3, pp. 5–8.
- [9] Zaides S.A., Ngo K.K. Otsenka napriazhennogo sostoiianiia pri stesnennykh usloviakh lokal'nogo nagruzheniia [Evaluation of stress state in cramped conditions of local loading]. *Uprochniaiushchie tekhnologii i pokrytiia* [Strengthening Technologies and Coatings]. 2016, no. 10, pp. 6–9.
- [10] Drapkin B.M., Kononenko V.K., Bez"iazychnyi V.F. *Svoistva splavov v ekstremal'nom sostoianii* [The properties of the alloys at extreme condition]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2004. 256 p.
- [11] Prihod'ko V.M., Petrova L.G., Chudina O.V. *Metallofizicheskie osnovy razrabotki uprochniaiushchikh tekhnologii* [Metal-physical basis for the development of hardening technologies]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2003. 384 p.
- [12] Smelianskii V.M. *Mekhanika uprochneniia detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Mechanics hardening of parts surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2002. 300 p.
- [13] *Effektivnye tekhnologii poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniia i kombinirovannoi obrabotki* [Efficient technologies of surface plastic deformation and combined treatment]. Ed. Kirichek A.V. Moscow, Publishing house Spektr, 2014. 403 p.
- [14] Makhlov M.S. Raschetnye modeli ostatochnykh napriazhenii poverkhnostnogo sloia posle uprochneniia sposobami poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniia [The surface layer residual stresses tensor prediction models after hardening by surface layer plastic deformation methods]. *Obrabotka metallov* [Metal Working and Material Science]. 2012, no. 3, pp. 110–115.
- [15] *Tekhnologiia i instrumenty otelchno-uprochniaiushchei obrabotki detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem: spravochnik* [Technology and tools of finishing-strengthening processing of details by surface plastic deformation]. Vol. 1. Ed. Suslov A.G. Moscow, Mashinostroenie publ., 2014. 480 p.
- [16] Kopylov Iu.R. *Dinamika protsessov vibroudarnogo uprochneniia* [Dynamics of vibro-impact hardening]. Voronezh, Nauchnaia kniga publ., 2011. 569 p.

## Информация об авторах

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

**НГО Као Кыонг** (Иркутск) — аспирант кафедры «Машиностроительные технологии и материалы». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: cuong.istu@gmail.com).

## Information about the authors

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

**NGO Cao Cuong** (Irkutsk) — Postgraduate, Mechanical Engineering Technologies and Materials Department. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: cuong.istu@gmail.com).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет 2-е издание монографии  
**Г.А. Бигуса, Ю.Ф. Даниева, Н.А. Быстровой,  
Д.И. Галкина**

### «Основы диагностики технических устройств и сооружений»

В монографии приведены основные понятия технической диагностики — области знаний, охватывающей теорию, методы и средства определения технического состояния объектов. Значительное внимание уделено методам неразрушающего контроля, правильное применение которых позволяет получить исходные данные для анализа, проводимого при техническом диагностировании. Изложены элементы теории надежности и методы расчета показателей надежности в приложении к технической диагностике. Рассмотрены вопросы идентификации состояния объекта по измеренным диагностическим параметрам и оценки его ресурса. Книга предназначена для специалистов в области диагностики технических устройств, экспертов в области промышленной безопасности, а также студентов, обучающихся по соответствующим специальностям. В монографии приведены основные понятия технической диагностики — области знаний, охватывающей теорию, методы и средства определения технического состояния объектов. Значительное внимание уделено методам неразрушающего контроля, правильное применение которых позволяет получить исходные данные для анализа, проводимого при техническом диагностировании. Изложены элементы теории надежности и методы расчета показателей надежности в приложении к технической диагностике. Рассмотрены вопросы идентификации состояния объекта по измеренным диагностическим параметрам и оценки его ресурса.

Книга предназначена для специалистов в области диагностики технических устройств, экспертов в области промышленной безопасности, а также студентов, обучающихся по соответствующим специальностям.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

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