

## ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ ENGINEERING TECHNOLOGY

Научная статья

УДК 621.787, 621.789

DOI: 10.26730/1999-4125-2022-3-4-12

### ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МУЛЬТИРАДИУСНЫМ РОЛИКОМ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 45

Митрофанова Кристина Сергеевна

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

\*для корреспонденции: kirmeetzz@mail.ru



#### Информация о статье

Поступила:

19 мая 2022 г.

Одобрена после  
рецензирования:

7 июня 2022 г.

Принята к публикации:

17 июня 2022 г.

#### Ключевые слова:

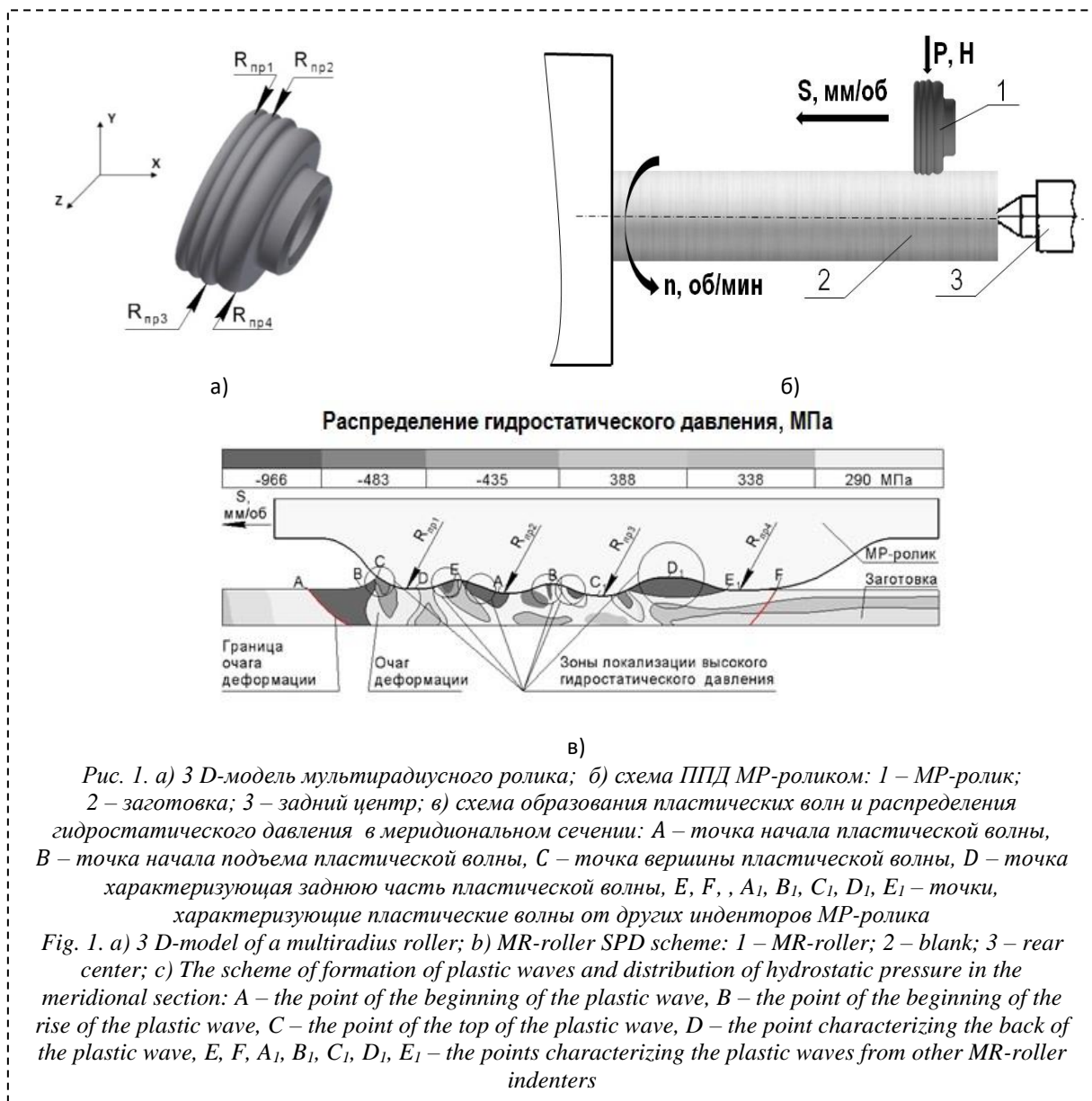
поверхностное пластическое деформирование, мультирадиусный ролик, микротвердость, структурно-фазовое состояние, полоса локализованной деформации, оптическая микроскопия, атомно-силовая микроскопия

#### Аннотация.

В статье приведены результаты исследования структуры и микротвердости поверхностного слоя образцов из стали 45 после поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом. Целью работы является установление особенностей структурно-фазового состояния и микротвердости образцов из стали 45 в зависимости от интенсивности режима обработки мультирадиусным роликом. Применены методы оптической и атомно-силовой микроскопии, которые позволили исследовать структуру стали 45 на микро- и мезоуровнях в исходном состоянии и после обкатывания мультирадиусным роликом. Использование данных методик позволило определить параметры структуры стали 45: размеры зерен и субзерен, их однородность; деформационный рельеф; расположение и размеры полосы локализованной деформации и интенсивно деформированного слоя, образовавшегося в результате обработки мультирадиусным роликом. Полученные данные свидетельствуют о том, что, несмотря на интенсивные режимы обкатывания, приводящие к снижению шероховатости, значительному увеличению микротвердости и измельчению структуры стали 45, разрушения поверхностного слоя детали не происходит. Кроме того, показано, что обкатывание с наибольшим усилием приводит к образованию в поверхностном слое полосы локализованной деформации, в зоне которой наблюдаются высокие значения микротвердости.

**Для цитирования:** 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 (151). С. 4-12. doi: 10.26730/1999-4125-2022-3-4-12

В настоящее время известно, что качество поверхностного слоя (ПС) влияет на работоспособность и долговечностей деталей машин. Также известно, что повысить качество ПС ответственных деталей машин можно финишными и отделочно-упрочняющими методами обработки, в том числе поверхностным пластическим деформированием (ППД) [1]. Сущность ППД заключается в накатывании поверхностного слоя детали деформирующими инструментами (шариками или роликами) без образования стружки. Метод ППД получил существенное



развитие в период с 1950 по 1980 г.г., однако и в настоящее время технология развивается в ряде направлений [2-7]. Одним из таких направлений является разработка и применение сложнопрофильных деформирующих инструментов. Подобные инструменты позволяют создавать оригинальные схемы нагружения ПС, предполагающие наличие интенсивного напряженно-деформированного состояния в очаге деформации (ОД) поверхностного слоя обрабатываемой детали.

В рамках данной работы использован мультирадиусный деформирующий ролик (МР-ролик) (рис. 1, а), представляющий собой комбинацию четырех деформирующих элементов (ДЭ), расположенных относительно друг друга с некоторым смещением в осевом и радиальном направлениях [8]. Процесс ППД МР-роликом заключается в поэтапном нагружении ПС деформирующими инденторами МР-ролика ( $R_{пр1}$ ,  $R_{пр2}$ ,  $R_{пр3}$ ,  $R_{пр4}$ ), в результате приводящем к созданию высокого гидростатического давления (рис. 1, б,в) в очаге деформации. Это было подтверждено предыдущими МКЭ-исследованиями процесса обработки [9] и экспериментами, в которых были установлены особенности формирования микроструктуры поверхностного слоя [10].

Целью работы является установление особенностей структурно-фазового состояния и микротвердости образцов из стали 45 в зависимости от режима обработки МР-роликом с применением набора методик, обеспечивающих разное пространственное разрешение – оптическая (ОМ) и атомно-силовая микроскопия (АСМ).

Таблица 1. Химический состав стали 45 ГОСТ 1050-88

Table 1. Chemical composition of steel 45 GOST 1050-88

C%	Si%	Mn%	Cr%	S%	P%	C%	Si%
0,40	0,37	0,6	0,24	0,03	0,030	0,40	0,37

Таблица 2. Механические и физические свойства стали 45 ГОСТ 1050-88 после нормализации

Table 2. Mechanical and physical properties of steel 45 GOST 1050-88 after normalization

$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_s$ , МПа	$\Psi$ , %	$\delta$ , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>	HV
355	600	16	40	49	160-180

Таблица 3. Режимы обкатывания и состояние образцов

Table 3. Processing modes and condition of samples

№ образца, состояние	Усилие обкатывания, P, Н	Подача, S, мм/об	Частота, n, об/мин
Образец №1, обработка МР-роликом по режиму 1	2500	0,07	630
Образец №2, обработка МР-роликом по режиму 2	4750		

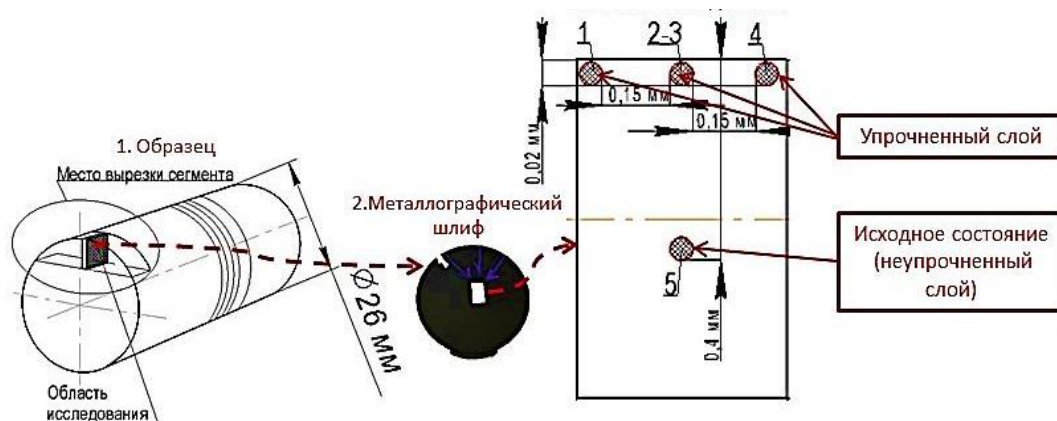


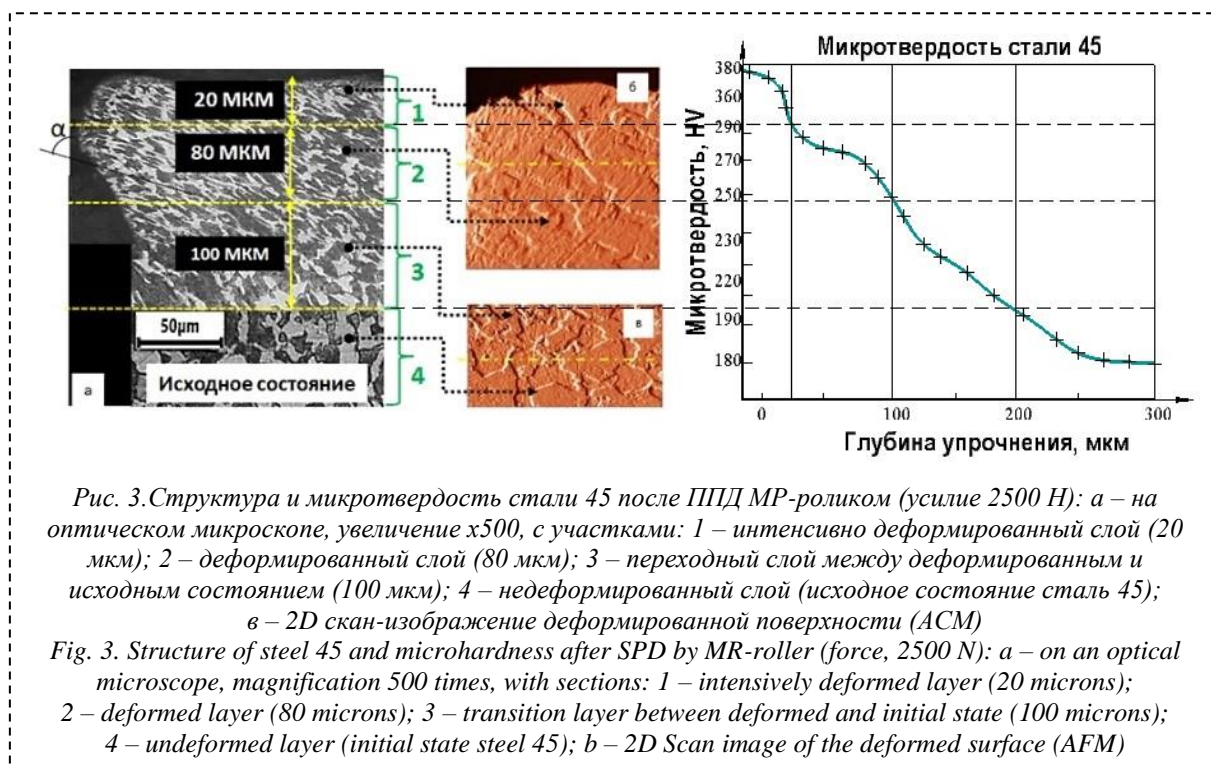
Рис. 2. Схема исследования образцов методами ОМ и АСМ: 1 – точка сканирования (левый, верхний край шлифа, упроченный слой); 2-3 – точки сканирования (середина шлифа, упроченный слой); 4 – точка сканирования (правый, верхний край шлифа, упроченный слой); 5 – точка сканирования (центр шлифа, неупрочненный слой)

Fig. 2. The scheme of the study of samples by OM, AFM methods: 1 – scanning point (left, upper edge of the slot, hardened layer); 2-3 – scanning points (middle of the slot, hardened layer); 4 – scanning point (right, upper edge of the slot, hardened layer); 5 – scanning point (center of the slot, non-reinforced layer)

Методика проведения эксперимента заключалась в обкатывании МР-роликом цилиндрических образцов ( $\varnothing 26$  мм) из стали 45 (ГОСТ 1050-88). Химический состав и физико-механические свойства металла представлены в таблицах 1-2. Обработка ППД мультирадиусным роликом проводилась на токарно-винторезном станке с ЧПУ с использованием специальной роликовой установки по режимам, приведенным в таблице 3. Исходная шероховатость образцов составляла  $Ra 0,70$ , исходная микротвердость составляла 160-180 HV, средняя величина зерна стали 45 в исходном состоянии составила  $\sim 55$  мкм.

После обкатывания МР-роликом следовала пробоподготовка металлографических шлифов, на поверхности которых не допускалось наличия любых дефектов. Схема исследования приведена на рис. 2.

Параметры структуры исследуемых шлифов, а именно размеры зерен и субзерен, их однородности определялись металлографическим способом на оптическом микроскопе (ОМ) отраженного света «Neophot-21» при увеличении  $\times 500$ . Атомно-силовая микроскопия (АСМ) проводилась с использованием атомно-силового микроскопа «Solver PH47-PRO». Рабочая зона зондового датчика (кантилевера) прибора имеет размеры  $\sim 10$  нм, характерное расстояние между кантилевером и поверхностью исследуемого образца варьировалась в пределах от 0,1 до 10 нм,



что в результате позволило получить изображения топографии поверхности образца с высоким разрешением.

Установлено, что после ППД МР-роликом с усилием 2500 Н шероховатость ПС составляла  $Ra$  0,2 мкм. Средний размер зерна на расстоянии 0,01-0,02 мм от свободного края поверхности составляет 15-20 мкм. При увеличении x500 можно наблюдать вытягивание зерен в направлении подачи инструмента (рис. 3, а).

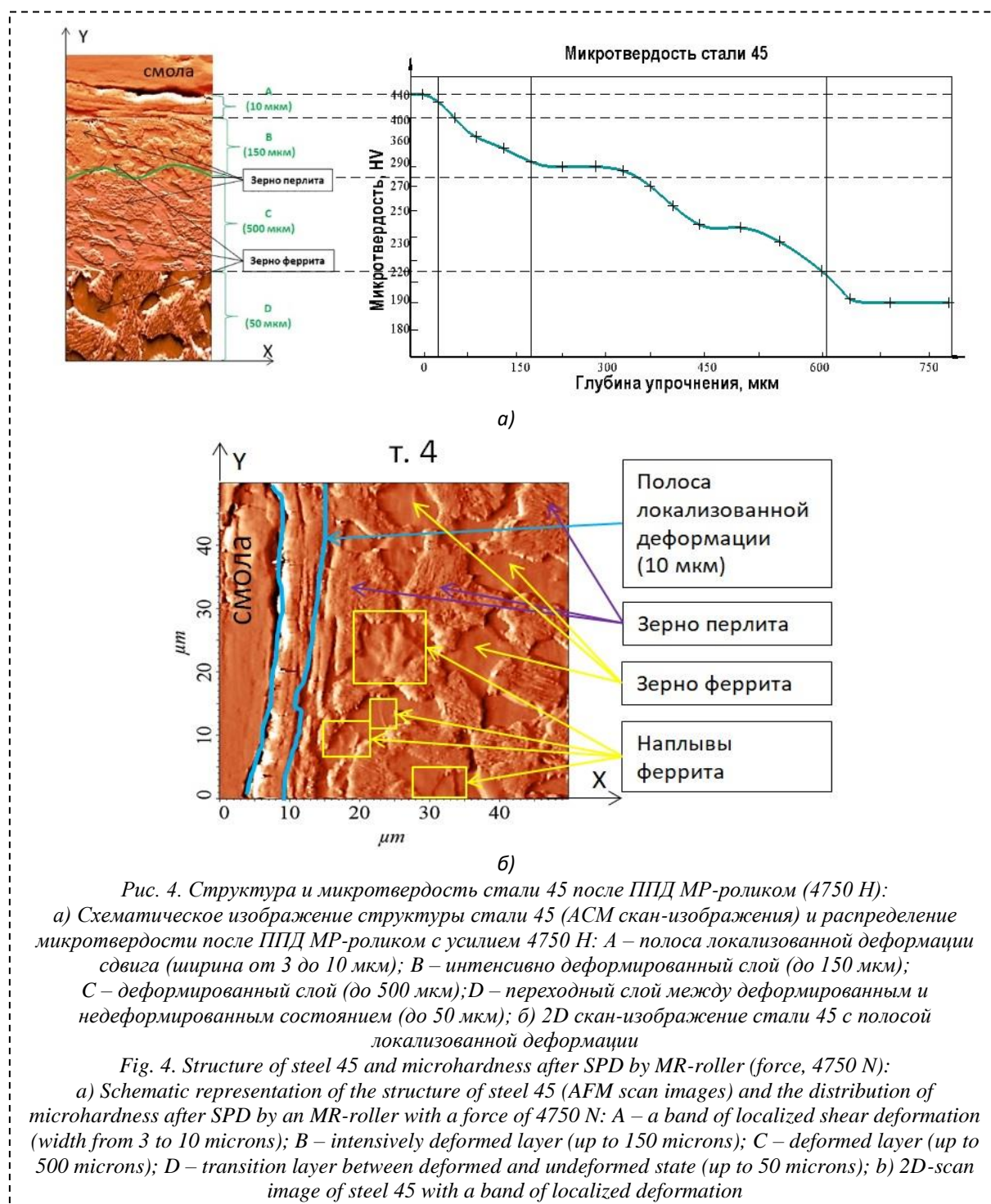
Размеры зерен в поверхностном слое и центральной (неупрочненной) части образца визуально выглядят одинаково, а границы зерен четко выражены. Микротвердость в области интенсивно деформированного слоя достигает высоких значений и варьируется в пределах от 360 до 380 HV. На глубине 20 мкм от поверхности можно наблюдать деформированный слой (глубиной 80 мкм), в котором зерна также имеют вытянутую форму, но имеют несколько большие размеры. Средний размер зерна в данной области составил ~ 15-18 мкм. Микротвердость в области интенсивно деформированного слоя достигает высоких значений и варьируется в пределах от 250 до 290 HV. На глубине 100 мкм от поверхности обнаружен переходный слой между деформированным и исходным состоянием (глубина 100 мкм), в котором можно наблюдать увеличение размеров зерен (рис. 3, а). Средний размер зерна на данном участке составил ~ 18-20 мкм. Микротвердость в области интенсивно деформированного слоя достигает высоких значений и варьируется в пределах от 220 до 250 HV.

После ППД МР-роликом с усилием 4750 Н по сравнению с усилием обработки 2500 Н шероховатость несколько увеличивается и достигает  $Ra$  0,31 мкм. Упрочненный слой материала на глубине более 400 мкм характеризуется значительной деформацией, которая обнаруживается по вытянутым зернам феррита и перлита.

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что обработка ППД МР-роликом образца из стали 45 с усилием 4750 Н приводит к образованию деформированного слоя (глубиной до 700 мкм) с соответствующими зонами, характеризующимися структурными особенностями (рис. 4):

- А – полоса локализованной деформации сдвига (ширина от 3 до 10 мкм), не идентифицируемая на оптическом микроскопе, обнаружена на атомно-силовом микроскопе, характеризуемая высокими значениями микротвердости (до 460 HV). При этом отмечается четкая граница между полосой локализованной деформации и интенсивно деформированным слоем (рис. 4 а, б), где зерна феррита и перлита имеют вытянутую форму и имеют одну ориентацию (рис. 4). В свою очередь, из работы [11] известно, что перлит и перлитные колонии,





их расположение по отношению к прикладываемой нагрузке оказывают существенное влияние как на деформационное поведение материала, так и на его разрушение. Согласно ряду исследований [12-17], микроструктура полос локализованной деформации, как правило, очень тонкая и равноосная. Формируется полоса деформации в результате наличия неоднородной, высокоскоростной деформации и высокого гидростатического давления в зоне обработки. В свою очередь, неоднородность деформации может являться результатом структурной нестабильности. Размер зерен или ячеек в данной области составляет от одной до нескольких десятых долей микрометра, а разориентировка между ними либо не идентифицируется, либо колеблется в пределах от 2 до 15 градусов. Существует большая вероятность того, что значительное увеличение микротвердости полосы локализованной деформации вызвана в первую очередь тонкостью зернистой структуры (рис. 4, б);

- В – интенсивно деформированный слой (глубина от 25-150 мкм), идентифицирующийся на ОМ-изображениях, как структура смешанного типа. Средний размер зерна составляет 9-13 мкм. Зерна преимущественно вытянутой формы в направлении подачи инструмента и имеют одну ориентацию. Микротвердость в данной области также характеризуется высокими значениями и варьируется в пределах от 290-390 HV (рис. 4);

- С – деформированный слой (глубина от 450 до 500 мкм), характеризующийся наличием тонких, вытянутых, одинаково ориентированных зерен. Значения микротвердости в данной области несколько снижаются и варьируются в пределах 220 от до 280 HV (рис. 4);

- D – переходный слой между деформированным и недеформированным состоянием (глубина до 50 мкм). Значения микротвердости в данной области не превышают 220 HV (рис. 4).

Таким образом, обработка ППД МР-роликом образцов из стали 45 с усилием 4750 Н по сравнению с обработкой с меньшим усилием 2500 Н приводит к появлению значительного деформированного слоя (глубиной до 700 мкм), для которого характерно наличие вблизи свободного края поверхности полосы локализованной деформации (шириной до 10 мкм). Именно в данной зоне значения микротвердости достигают своих максимальных значений (до 460 HV), при этом увеличение микротвердости можно наблюдать и на глубине до 3050 мкм. Также обработка с усилием 4750 Н приводит к измельчению структуры более чем в 3 раза без разрушения поверхностного слоя детали.

*«Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00587».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блюменштейн В. Ю., Смелянский В. М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. Москва: Машиностроение-1, 2007. 400 с.
2. Блюменштейн В. Ю. Механика технологического наследования как научная основа проектирования процессов упрочнения деталей машин поверхностным пластическим деформированием: дис. д-ратехн. наук: 05.02.08. Москва, 2002. 595 с.
3. Altenberger I. Deep rolling—the past, the present and the future // Conf. Proc.: ICSP. – 2005.
4. Kuznetsov V. P., Tarasov S. Y., Dmitriev A. I. Nanostructuring burnishing and subsurface shear instability // J. Mater. Process. Technol. – 2015. – Vol.217. – P.327-335.
5. Liu D., Liu D., Zhang X., Liu C., Ao N. Surface nanocrystallization of 17-4 precipitation-hardening stainless steel subjected to ultrasonic surface rolling process // Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing. 2018. Vol. 726. P.69-81
6. Митрофанова К. С. Исследование патентной активности в области технологий отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т. 15. № 12 (180). С. 572-576.
7. Chen S., Wang Z., Chakraborty A. et al. Robotic deep rolling with iterative learning motion and force control // IEEE Robotics and Automation Letters (RAL). 2020.
8. Патент №2557377, Российская Федерация. Ролик обкатной мультирадиусный: № 2013135797/02; заявл. 20.07.2015; опубл. 27.05.2016, Бюл. № 27 (II ч.). 6 с.
9. Krechetov A. A., Mitrofanova K. S. The study of multiradius roller running process// MATEC Web of Conferences. 2019.Vol. 297. 05003.
10. Blumenstein V. Yu., Mitrofanova K. S. Study of the parameters of the pure iron structure after surface plastic deformation treatment with a complex-profile tool // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1029 (1). Iss. 012013.
11. Berisha B., Raemy C. Multiscale modeling of failure initiation in a ferritic–pearlitic steel // ActaMaterialia. 2015. 100. P. 191-201.
12. Xue Q., Gray G.T. Development of adiabatic shear bands in annealed 316L stainless steel: Part II. TEM studies of the evolution of microstructure during deformation localization// Metallurgical and Materials Transactions A. – 2006. – P.2447-2458.
13. Rogers H. C. ADIABATIC PLASTIC DEFORMATION // Ann. Rev. Mater. Sci. 1979. Vol. 9. P. 283-311.
14. Dougherty L. M., Cerreta E. K., Gray G. T., Trujillo C. P. Mechanical behavior and micro-structural development of low-carbon steel and microcomposite steel reinforcement bars deformed under quasi-static and dynamic shear loading // Metallurgical and materials transactions A. 2009. Vol. 40A. P.1835-1850.

15. Huang R., Li Q.-J., Wang Z.-J., Huang L., Li J., Ma E., Shan Z. W. Flow stress in submicron bcc iron single crystals: sample-size-dependent strain-rate sensitivity and rate-dependent size strengthening Materials Research Letters 2015. P. 121-127.

16. Maier V., Schunk C., Göken M., Durst K. Micro-structure-dependent deformation behaviour of bcc-metals – indentation size effect and strain rate sensitivity // Philosophical Magazine. 2015. Vol. 95(16-18). P.1766-1779.

17. Kappacher J., Renk O., Kiener D., Clemens H., Maier-Kiener V. How grain boundary characteristics influence plasticity close to and above the critical temperature of ultra-fine grained bcc Ta2.5W. // ActaMaterialia. 2021. Vol. 216. P. 117110.

© 2022 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*Об авторах:*

**Митрофанова Кристина Сергеевна**, аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), kirmeezz@mail.ru

*Заявленный вклад авторов:*

Митрофанова К.С. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Original article

**THE EFFECT OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION BY A MULTIRADIUS ROLLER ON THE STRUCTURAL-PHASE STATE AND MICROHARDNESS OF STEEL 45 SAMPLES**

Kristina S. Mitrofanova

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

\*for correspondence: kirmeezz@mail.ru

**Article info**

Submitted:

19 May 2022

Approved after reviewing:

7 June 2022

Accepted for publication:

17 June 2022

**Keywords:** surface plastic deformation, multiradius roller, microhardness, structural-phase state, localized deformation band, optical microscopy, atomic force microscopy

**Abstract.**

The article presents the results of a study of the structure and microhardness of the surface layer of 45 steel (ASTM 1045) samples after surface plastic deformation by a multiradius roller. The aim of the work is to establish the features of the structural-phase state and microhardness of samples made of 45 steel, depending on the intensity of the treatment mode with a multiradius roller. The methods of optical and atomic force microscopy were applied, which made it possible to study the structure of steel 45 at the micro and mesolevels in the initial state and after rolling with a multiradius roller. The use of these techniques made it possible to determine the parameters of the structure of steel 45: grain and subgrain sizes, their uniformity; deformation relief; location and dimensions of the localized deformation band and the intensively deformed layer formed as a result of processing with a multiradius roller. The data obtained indicate that, despite the intensive running-in modes leading to a decrease in roughness, a significant increase in microhardness and grinding of the structure of steel 45, the destruction of the surface layer of the part does not occur. In addition, it is shown that rolling with the greatest effort leads to the formation of a localized deformation band in the surface layer, in the zone of which high microhardness values are observed.

**For citation:** 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; 3(151):4-12. (In Russ., abstract in Eng.). doi: 10.26730/1999-4125-2022-3-4-12

## REFERENCES

1. Blumenstein V.Yu., Smelyansky V.M. Mechanics of technological inheritance at the stages of processing and operation of machine parts. Moscow: Mashinostroenie-1; 2007. 400 p.
2. Blumenstein V.Yu. Mechanics of technological inheritance as a scientific basis for designing processes of hardening of machine parts by surface plastic deformation: dis. Doctor of Technical Sciences: 05.02.08. Moscow: 2002. 595 p.
3. Altenberger I. Deeprolling—the past, the present and the future. *ConfProc: ICSP*. 2005.
4. Kuznetsov V.P., Tarasov S.Y., Dmitriev A.I. Nanostructuring burnishing and subsurface shear instability. *J. Mater. Process. Technol.* 2015; 217: 327-335.
5. Liu D., Liu D., Zhang X., Liu C., Ao N. Surface nanocrystallization of 17-4 precipitation-hardening stainless steel subjected to ultrasonic surface rolling process. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*. 2018; 726: 69-81
6. Mitrofanova K.S. Research of patent activity in the field of technologies of finishing and hardening treatment by surface plastic deformation. *Hardening technologies and coatings*. 2019; 15(12(180)): 572-576.
7. Chen S., Wang Z., Chakraborty A. et al. Robotic deep rolling with iterative learning motion and force control / S. Chen, Z. Wang, A. Chakraborty, M. Klecka, G. Saunders, J. Wen. *IEEE Robotics and Automation Letters (RAL)*. 2020.
8. Patent No. 2557377, Russian Federation. Roll-in multiradius roller: No. 2013135797/02; application 20.07.20153; publ. 27.05.2016, Bul. No. 27 (II part). 6 p.
9. Krechetov A.A., Mitrofanova K.S. The study of multiradius roller running process. *MATEC Web of Conferences*. 2019; 297: 05003.



10. Blumenstein V.Yu., Mitrofanova K.S. Study of the parameters of the pure iron structure after surface plastic deformation treatment with a complex-profile tool. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1029 (1(012013)).
11. Berisha B., Raemy C. Multiscale modeling of failure initiation in a ferritic–pearlitic steel. *Acta Materialia*. 2015; 100; 191-201.
12. Xue Q., Gray G.T. Development of adiabatic shear bands in annealed 316L stainless steel: Part II. TEM studies of the evolution of microstructure during deformation localization. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2006; 2447-2458.
13. Rogers H.C. ADIABATIC PLASTIC DEFORMATION. *Ann. Rev. Mater. Sci.* 1979; 9: 283-311.
14. Dougherty L.M., Cerreta E.K., Gray G.T., Trujillo C.P. Mechanical behavior and micro-structural development of low-carbon steel and microcomposite steel reinforcement bars deformed under quasi-static and dynamic shear loading. *Metallurgical and materials transactions A*. 2009; 40A: 1835-1850.
15. Huang R., Li Q.-J., Wang Z.-J., Huang L., Li J., Ma E., Shan Z.W. Flow stress in submicron bcc iron single crystals: sample-size-dependent strain-rate sensitivity and rate-dependent size strengthening. *Materials Research Letters*. 2015. P. 121-127.
16. Maier V., Schunk C., Göken M., Durst K. Micro-structure-dependent deformation behaviour of bcc-metals – indentation size effect and strain rate sensitivity. *Philosophical Magazine*. 2015; 95(16-18): 1766-1779.
17. Kappacher J., Renk O., Kiener D., Clemens H., Maier-Kiener V. How grain boundary characteristics influence plasticity close to and above the critical temperature of ultra-fine grained bcc Ta2.5W. *Acta Materialia*. 2021; 216: 117110.

© 2022 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*The authors declare no conflict of interest.*

*About the authors:*

**Kristina S. Mitrofanova**, Postgraduate, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), [kirmeetzz@mail.ru](mailto:kirmeetzz@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

Kristina S. Mitrofanova – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; drawing the conclusions; writing the text.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

