



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov







Структурные превращения в поверхностном слое при обработке мультирадиусным деформирующим инструментом

Валерий Блюменштейн^{1, а, *}, Владимир Кукареко^{2, б}

¹ Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачёва, ул. Весенняя, 28, г. Кемерово, 650000, Россия

² Объединенный институт машиностроения НАН Республики Беларусь, ул. Академическая, 12, г. Минск, 220072, Республика Беларусь

^а  <http://orcid.org/0000-0002-3711-1535>,  blumenstein@rambler.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0003-4283-871X>,  v_kukareko@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.787

История статьи:

Поступила: 01 февраля 2018
 Рецензирование: 20 февраля 2018
 Принята к печати: 21 марта 2018
 Доступно онлайн: 15 июня 2018

Ключевые слова:

Поверхностное пластическое деформирование
 Мультирадиусный инструмент
 Структура
 Фазовый состав
 Упрочнение

Благодарности:

Авторы выражают признательность к.т.н. доценту Махалову М.С., к.т.н., с.н.с. Григоричу А.Н. и аспиранту Митрофановой К.С., принявших участие в проведении экспериментальных исследований.

АННОТАЦИЯ

Цель работы: расширение технологических возможностей процесса упрочнения ППД за счет применения мультирадиусного ролика (МР), создающего большое гидростатическое давление в очаге деформации. **Материалы и методы исследования.** Экспериментальные кольцевые образцы $\varnothing 60$ мм изготавливались из отожженной стали 45 ГОСТ 1050–88 одной поставки. Твердость стали составляла 190 HV 10. Механическая обработка включала черновое и чистовое точение с малыми припусками 0,25 и 0,15 мм соответственно, подачей 0,07 мм/об и частотой вращения шпинделя 1600 об/мин. После этого проводилось предварительное и окончательное шлифование наждачной бумагой с малой зернистостью. Такая обработка позволила исключить влияние шероховатости и дефектного слоя заготовки на качество обработанной поверхности детали. Обработка поверхностным пластическим деформированием (ППД) МР-роликом $\varnothing 60$ мм проводилась на токарно-винторезном станке с использованием специальной роликовой установки по двум режимам, отличающимся усилием обкатывания. МР-ролик имеет форму профиля рабочей поверхности в виде комбинации последовательно расположенных деформирующих элементов (ДЭ) с радиусами постоянной величины, расположенными относительно друг друга с некоторым смещением в радиальном и осевом направлении. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что обработка МР-роликом приводит к существенному возрастанию плотности дефектов кристаллической решетки в поверхностном слое, увеличению его микротвердости примерно в два раза, а также к деформационно-индуцированному растворению цементитных частиц Fe₃C. Показано, что возрастание усилия обкатывания стали МР-роликом обеспечивает более глубокое растворение цементитных частиц в деформированном поверхностном слое и интенсифицирует его упрочнение.

Для цитирования: Блюменштейн В.Ю., Кукареко В.А. Структурные превращения в поверхностном слое при обработке мультирадиусным инструментом // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 75–86. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-75-86.

Введение

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) относится к числу эффективных технологий отделочно-упрочняющей обработки, обеспечивающих упрочнение металла, создание в поверхностном слое благоприятных остаточ-

ных напряжений и требуемой шероховатости [1]. Развитие процессов ППД идет по пути выявления механизмов пластической деформации, рационального использования запаса пластичности металлов и сплавов в условиях различных схем нагружения, усложнения геометрии деформирующих инструментов и др.

Зуев Л.Б. с соавторами полагают, что пластическая деформация развивается локализованным образом, начиная от предела текучести и вплоть до разрушения образца или изделия [2–5]. Картины локализации тесно связаны

*Адрес для переписки

Блюменштейн Валерий Юрьевич, д.т.н., профессор
 Кузбасский государственный технический университет
 им. Т.Ф. Горбачёва,
 ул. Весенняя, 28, 650000, г. Кемерово, Россия
 Тел.: 8 (3842) 39-63-75, e-mail: blumenstein@rambler.ru

с законами деформационного упрочнения и в целом определяют как деформацию, так и разрушение материалов. В работах В.Е. Панина показано, что поверхностные слои нагруженных твердых тел являются самостоятельной подсистемой, в которой развиваются волновые механизмы пластического течения, определяющие зарождение первичных деформационных дефектов всех видов [6–8]. Выявлено, что больший эффект достигается при упрочнении высоколегированных сталей с высоким содержанием остаточного аустенита [9].

В статье [10] приведены результаты исследования процесса ППД, где индуцированная деформацией мартенситная трансформация метастабильного аустенита легированной стали используется для эффективного поверхностного упрочнения. Поверхностные и подповерхностные изменения, вызванные обкатыванием роликом закаленной стали *AISI 1060* ($756\text{ HV }0,5$), представлены в работах [11]. Количество остаточного аустенита, индуцированного пластической деформацией, достигло максимального значения при обкатывании за один рабочий ход с давлением 20 МПа.

Известны научные решения по повышению пластичности в условиях высокого гидростатического давления. При исследовании локализованной пластичности и разрушения при микросжатии нанокристаллического *Ni-W* сплава со средними размерами зерна 5, 15 и 90 нм установлено влияние размера и границ зерна на кривую течения и характер разрушения [12]. Авторы статьи [13] представили результаты исследования гидростатического давления и растягивающих растяжений с позиций взаимодействия твердой и мягкой фаз двухфазных сплавов с различными микроструктурами.

Особое внимание исследователи уделяют созданию схем обработки, позволяющих в максимально возможной мере использовать пластические свойства металла [14–15]. Одним из приоритетных направлений является разработка и реализация методов интенсивной пластической деформации (ИПД), особенность которых заключается в большом гидростатическом давлении в очаге деформации [16]. Это позволяет достичь уникального сочетания таких свойств, как исключительно высокая прочности и пластичность поверхностного

слоя металлического материала при комнатной температуре [17].

В последние годы разработана теория формирования и трансформации наследуемого состояния поверхностного слоя в процессах обработки и эксплуатации – механика технологического наследования (ТН) [18]. Показано, что расширение технологических возможностей ППД возможно за счет создания схем обработки с большим гидростатическим давлением и количеством участков квазимонотонной деформации. Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований позволили разработать новую конструкцию деформирующего инструмента, имеющего сложный рабочий профиль – мультирадиусный ролик [19]. Это потребовало проведения теоретических и экспериментальных исследований для оценки напряженно-деформированного состояния и определения характера накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности металла поверхностного слоя детали [19–20]. Вместе с тем влияние ППД с использованием мультирадиусного ролика на структуру и дюрометрические характеристики поверхностного слоя типичных конструкционных материалов подробно не исследованы.

Цель работы: расширение технологических возможностей процесса упрочнения ППД за счет применения мультирадиусного ролика (МР), создающего большое гидростатическое давление в очаге деформации.

Задачи исследований: проведение станочных экспериментов по обкатыванию образцов мультирадиусным инструментом; исследование структуры, фазового состава и дюрометрических свойств обкатанных образцов; установление закономерностей формирования структуры и свойств в условиях обкатывания с высоким гидростатическим давлением и большим числом участков квазимонотонной деформации.

Методика исследований

Экспериментальные кольцевые образцы $\varnothing 60$ мм изготавливались из отожженной стали 45 ГОСТ 1050–88 одной поставки. Твердость стали составляла $190\text{ HV }10$. Механическая обработка включала черновое и чистовое точение с малыми припусками 0,25 и 0,15 мм соответственно, подачей 0,07 мм/об и частотой

вращения шпинделя 1600 об/мин. После этого проводилось предварительное и окончательное шлифование наждачной бумагой с малой зернистостью. Такая обработка позволила исключить влияние шероховатости и дефектного слоя заготовки на качество обработанной поверхности детали. Обработка ППД мультирадиусным роликом (МР-ролик) $\varnothing 60$ мм проводилась на токарно-винторезном станке с использованием специальной роликовой установки по двум режимам, отличающимся между собой усилием обкатывания (табл. 1).

Ролик обкатной мультирадиусный (МР-ролик) имеет форму профиля рабочей поверхности в виде комбинации последовательно расположенных деформирующих элементов (ДЭ) с радиусами постоянной величины, расположенными относительно друг друга с некоторым смещением в радиальном и осевом направлении (рис. 1) [20].

Деформирующие элементы (ДЭ) имели профильные радиусы $R_{пр1} = 1$ мм, $R_{пр2} = 1$ мм, $R_{пр3} = 1$ мм, $R_{пр4} = 3$ мм и перемещались относительно поверхности с действительными натягами $h_{д1} = 0,05$ мм, $h_{д2} = 0,1$ мм, $h_{д3} = 0,15$ мм и $h_{д4} = 0,05$ мм. Расстояние вдоль оси детали между вершинами 1-го и 2-го ДЭ составило 1,855 мм, между вершинами 2-го и 3-го ДЭ – 1,84 мм, между вершинами 3-го и 4-го ДЭ – 3,2 мм.

Фиксация очага деформации выполнялась с помощью специального приспособления для

«отстрела», позволяющего отводить деформирующий инструмент от обрабатываемой поверхности примерно за 0,02 с. Это позволило получить четкую «не размытую» геометрию очага деформации. Далее из образцов на электроэрозионном станке в меридиональном сечении осуществлялась вырезка сегментов для дальнейших исследований.

Проведено МКЭ-моделирование процесса ППД мультирадиусным роликом и выявлена картина пластического течения металла в очаге деформации в условиях сложного напряженного состояния. Показано, что накопление степени деформации сдвига и исчерпание запаса пластичности металла происходят при отрицательном значении показателя схемы напряженного состояния. При этом даже при существенной накопленной деформации $\Lambda \varnothing 7,0$ степень исчерпания запаса пластичности не превышала значений $\Psi \varnothing 0,62$ [20].

Особенности структурных превращений при ППД мультирадиусным роликом стали 45 исследовали с помощью оптической микроскопии, а также посредством измерения микротвердости и выполнения рентгеноструктурного анализа.

Микроструктуру исследовали на оптическом микроскопе Альтами *MET1MT*. Измерение микротвердости по Виккерсу проводилось на твердомере *DuraScan 20* при нагрузке на индентор $P = 50$ г. Для удаления деформированных поверхностных слоев исследуемых образцов проводилось их электрохимическое полирование

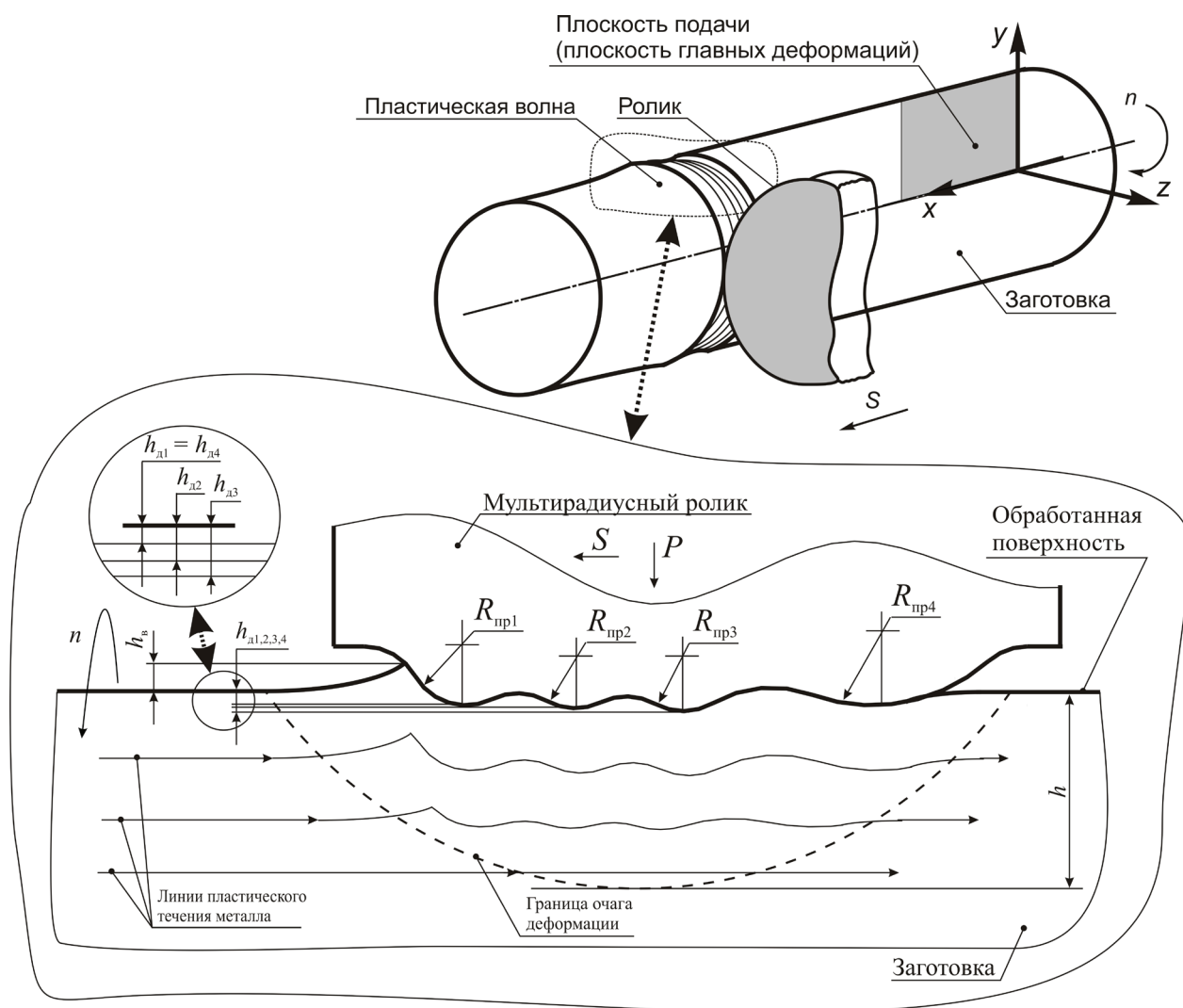
Таблица 1

Table 1

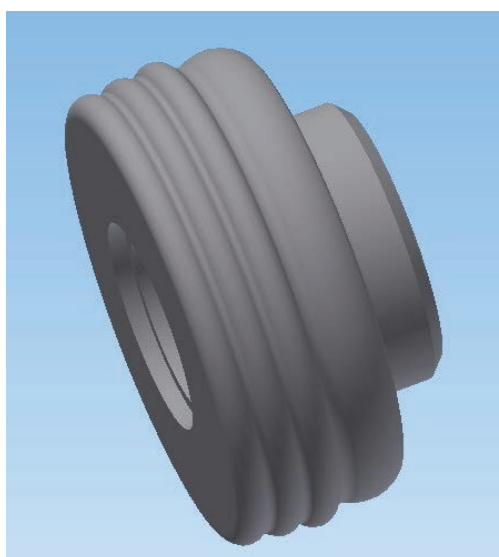
Состояние образцов и режимы поверхностного пластического деформирования

The state of the samples and the modes of the surface plastic deformation

Номер образца, состояние / Sample No., state	Усилие обкатывания, P , Н / Rolling force, P , Н	Подача, S , мм/об / Feed, S , mm/cycle	Частота, n , об/мин / Frequency, n , cycle/min
Образец № 1, исходное состояние (электрополировка) / Sample No. 1, initial state (electropolishing)	–	–	–
Образец № 2, обработка МР-роликом по режиму 1 / Sample No. 2, processing by MR roller according to the 1st processing mode	2000	0,07 / 0.07	630
Образец № 3, обработка МР-роликом по режиму 2 / Sample No. 3, processing by MR roller according to the 2nd processing mode	2500	0,07 / 0.07	630



a



б

Рис. 1. Схема поверхностного пластического деформирования мультирадиусным инструментом (a) и 3D модель мультирадиусного ролика (б)

Fig. 1. The scheme of surface plastic deformation by a multiradius tool (a) and 3D model of a multiradius roller (б)

в растворе, содержащем 640 мл H_3PO_4 и 120 г Cr_2O_3 [21].

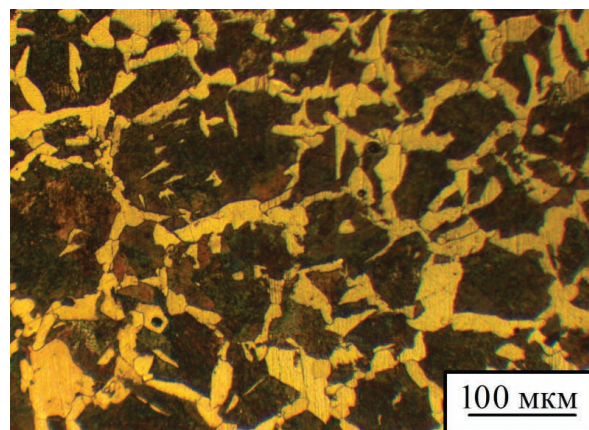
Рентгеноструктурный анализ проводился на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3.0 в монохроматизированном CoK_α излучении. Дифрагированный вторичный пучок монохроматизировался с помощью графитового монохроматора НГП. Съемка образцов проводилась при ускоряющем напряжении на рентгеновской трубке 30 кВ и анодном токе 10 мА. Запись интенсивности рассеянного рентгеновского излучения осуществлялась в режиме сканирования (по точкам) с фиксированным временем счета 10 с на точку. Шаг сканирования составлял $0,1^\circ$. Для фазового анализа использовалась стандартная картотека *PDF* [22]. Для определения величины физического уширения β дифракционных линий матричной фазы использовался метод аппроксимации [23]. В качестве аппроксимирующей функции выбиралась функция $1/(1 + \epsilon x^2)^2$.

Результаты и их обсуждение

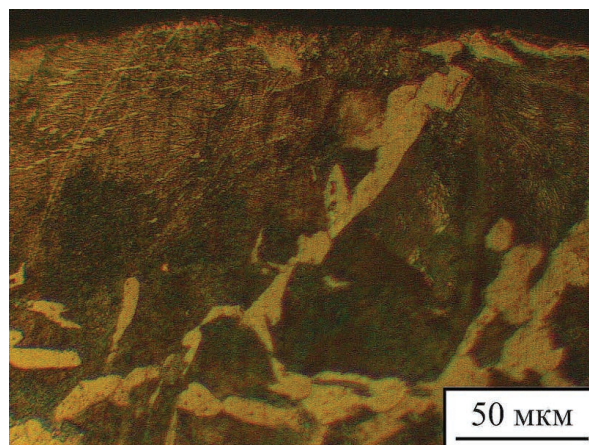
На рис. 2 представлена микроструктура исследуемых образцов стали 45 в исходном состоянии и после поверхностного пластического деформирования (ППД) МР-роликом по режиму 1. Можно видеть, что в исходном состоянии отожженная сталь имеет ферритно-перлитную структуру (рис. 2, а). В результате ППД в поверхностных слоях обработанной стали регистрируется вытягивание перлитных ламелей в направлении пластического течения металла (рис. 2, б).

На рис. 3 изображены фрагменты рентгеновских дифрактограмм от поверхностных слоев образца № 1 стали 45 в исходном состоянии (после электрополировки), а также образца № 2 после ППД МР-роликом по режиму 1.

В исходном состоянии отожженная сталь 45 содержит α -Fe (*S.G. Im3m*, $a = 0,28664$ нм) и цементит Fe_3C (*S.G. Pnma*, $a = 0,5091$ нм, $b = 0,6743$ нм, $c = 0,4526$ нм) (рис. 3, а). Определенное на электрополированных образцах стали 45 значение параметра ОЦК кристаллической решетки α -Fe составляет $a = 0,28664$ нм. Дифракционные линии матричной фазы α -Fe узкие, что свидетельствует о низкой концентрации в ней дефектов кристаллической решетки (рис. 3 и 4, табл. 2). Твердость отожженной стали 45 составляет $190 HV_{10}$.



а



б

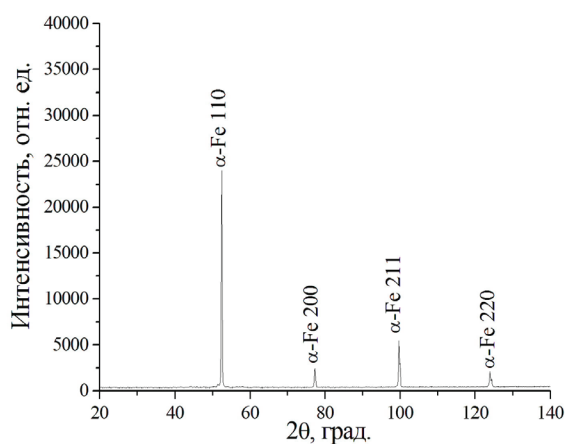
Рис. 2. Микроструктура стали 45:

а – исходное состояние (отжиг + электрополировка);
б – ППД с использованием МР-ролика по режиму 1

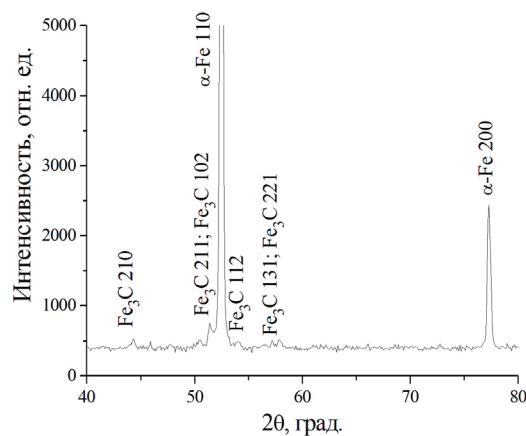
Fig. 2. The microstructure of steel 45:

а – initial state (annealing + electropolishing); б – SPD by a MR roller according to the 1st processing mode

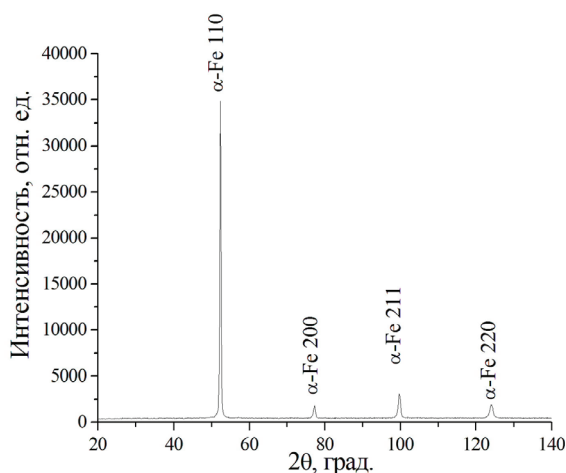
Поверхностное пластическое деформирование МР-роликом приводит к увеличению твердости поверхностного слоя отожженной стали 45 до $340...360 HV_{0,05}$ (табл. 2). Рентгеновские дифракционные линии от матричной α -фазы после ППД существенно размываются (рис. 3, з, 4, з, табл. 2). В частности, величина физического уширения дифракционной линии α -Fe возрастает до уровня $\beta_{220} \approx 20 \cdot 10^{-3}$ рад. Такое увеличение величины физического уширения связано с возрастанием концентрации дефектов кристаллической решетки (дислокаций, вакансий и т. п.) в α -фазе в процессе ППД. В пользу указанного вывода свидетельствует тот факт, что величина соотношения $\beta_{220}/\beta_{110} \approx \tan \theta_{220}/\tan \theta_{110}$ [23]. Кроме этого регистрируется сильное размытие и уменьшение интенсивности дифракцион-



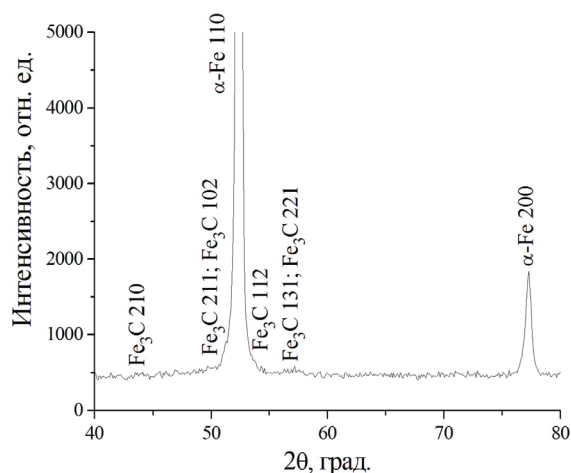
а



б



в



г

Рис. 3. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK_α) от поверхностных слоев отожженной и электрополированной стали 45 (а, б) и стали 45, подвергнутой обработке МР-роликом по режиму 1 (в, г)

Fig. 3. Fragments of the X-ray diffraction patterns (CoK_α) of surface layers of annealed and electropolished steel 45 (а, б) and steel 45, processed by a MR roller according to the 1st processing mode (в, г)

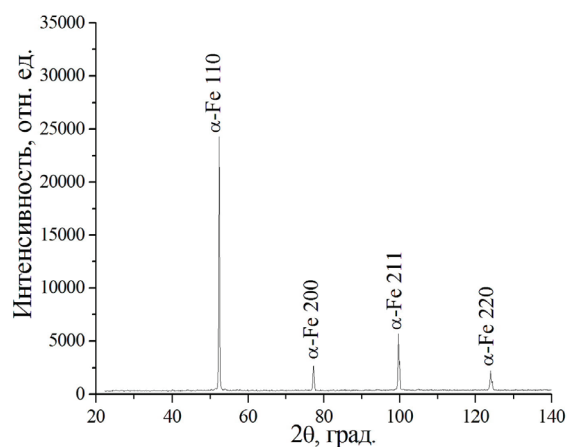
Таблица 2

Table 2

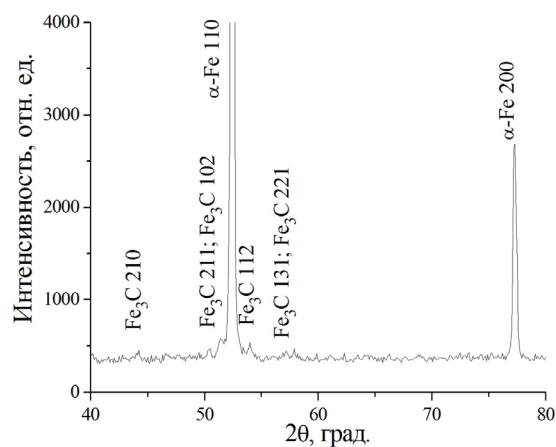
Значения физического уширения β_{110} и β_{220} дифракционных линий 110 и 220 α -Fe и микротвердости $HV\ 0,05$ после ППД МР-роликом по различным режимам

The values of intrinsic broadening β_{110} and β_{220} diffraction lines 110 and 220 α -Fe and microhardness $HV\ 0.05$ after SPD by a MR roller in different processing modes

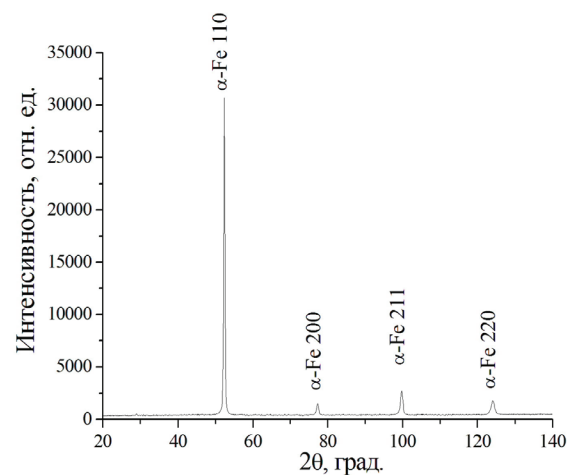
Образец – обработка / Sample – working	$\beta_{110}, 10^{-3}$ рад / $\beta_{110}, 10^{-3}$ rad	$\beta_{200}, 10^{-3}$ рад / $\beta_{200}, 10^{-3}$ rad	$\beta_{211}, 10^{-3}$ рад / $\beta_{211}, 10^{-3}$ rad	$\beta_{220}, 10^{-3}$ рад / $\beta_{220}, 10^{-3}$ rad	$HV\ 0,05$ / $HV\ 0.05$
№ 1 – электрополировка / No. 1 – electropolishing	1,2 / 1.2	1,5 / 1.5	1,7 / 1.7	2,5 / 2.5	200
№ 2 – ППД, режим 1 / No. 2 – SPD, the 1st pro- cessing mode	4,6 / 1.6	11,4 / 11.4	12,2 / 12.2	18,2 / 18.2	340
№ 3 – ППД, режим 2 / No. 3 – SPD, the 2nd pro- cessing mode	5,0 / 5.0	11,8 / 11.8	13,0 / 13.0	21,8 / 21.8	360



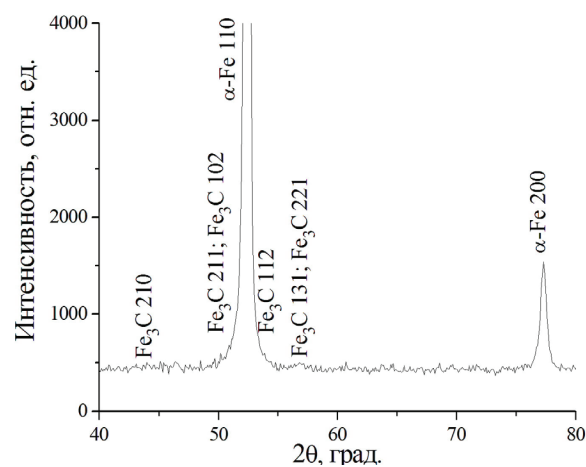
а



б



в



г

Рис. 4. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK_α) от поверхностных слоев отожженной и электрополированной стали 45 (а, б) и стали 45, подвергнутой обработке ППД МР-роликом по режиму 2 (в, г)

Fig. 4. Fragments of the X-ray diffraction patterns (CoK_α) from surface layers of annealed and electropolished steel 45 (а, б) and steel 45, processed by a SPD MR roller according to the 2nd processing mode (в, г)

ных линий от частиц Fe_3C (рис. 3, г). Значение параметра кристаллической решетки $\alpha\text{-Fe}$ для образцов стали 45, подвергнутых ППД, существенно увеличивается по сравнению с недеформированной сталью. В частности, для образцов № 2 и 3 значения параметра кристаллической решетки $\alpha\text{-Fe}$, определенные по угловому положению дифракционной линии 110, достигают значений 0,286 75 и 0,286 79 нм соответственно. Такое значительное возрастание параметра кристаллической решетки $\alpha\text{-Fe}$ может быть вызвано деформационно-индуцированным растворением цементитных частиц Fe_3C в процессе интенсивного пластического деформирования стали при обкатке роликом [24–25]. Образующийся при этом твердый раствор углерода в $\alpha\text{-Fe}$ характеризуется повышенными значениями параметра кристаллической решетки и твердости. Необхо-

димо отметить, что увеличение усилия обкатывания МР-роликом от 2000 Н (образец № 2) до 2500 Н (образец № 3) приводит к возрастанию физического уширения рентгеновских дифракционных линий, полученных от подвергнутого ППД слоя (табл. 2), а также величины его микротвердости до 360 HV 0,05. При этом регистрируется наиболее высокое значение параметра кристаллической решетки $\alpha\text{-Fe}$, что указывает на более глубокое растворение цементитных частиц при ППД по режиму 2 (образец 3).

В пользу модели растворения цементитных частиц при ППД свидетельствует также регистрируемое уменьшение интенсивности дифракционных линий от частиц Fe_3C на дифрактограммах, полученных от подвергнутых ППД образцов стали (рис. 3 и 4). Кроме того, значение параметра кристаллической решетки $\alpha\text{-Fe}$,

рассчитанное с использованием данных от дифракционных линий, располагающихся на больших углах рассеяния, закономерно снижается и приближается к табличному значению. Последнее обстоятельство указывает на уменьшение значения параметра решетки α -Fe с увеличением глубины анализируемого слоя, что может быть вызвано уменьшением степени деформации (и соответственно растворения цементита) на глубинах $> 20 \dots 30$ мкм от деформированной поверхности.

Выводы

1. Исследовано влияние поверхностной пластической деформации с использованием мультирадиусного ролика (МР) на структурное состояние и микротвердость поверхностного слоя отожженной стали 45.

2. Установлено, что обработка МР-роликом приводит к существенному возрастанию плотности дефектов кристаллической решетки в поверхностном слое, увеличению его микротвердости в ≈ 2 раза, а также к деформационно-индуцированному растворению цементитных частиц Fe_3C .

3. Показано, что возрастание усилия обкатывания стали МР-роликом обеспечивает более глубокое растворение цементитных частиц в деформированном поверхностном слое и интенсифицирует его упрочнение.

4. Выявленные закономерности процесса упрочнения мультирадиусным инструментом с высоким гидростатическим давлением и большим числом участков квазимонотонной деформации свидетельствуют о накоплении существенных деформаций (упрочнении) без разрушения металла, что позволяет повысить свойства обкатанных изделий в условиях приложения эксплуатационных нагрузок.

Список литературы

1. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием. В 2 т. Т. 1: справочник / А.Г. Суслов, В.Ю. Блюменштейн, Р.В. Гуров, А.Н. Исаев, Л.Г. Одинцов, В.В. Плешаков, В.П. Федоров, Ю.Г. Шнейдер; под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2014. – 480 с.

2. Zuev L.B., Danilov V.I., Barannikova S.A. Plastic flow, necking and failure in metals, alloys and ceramics //

Materials Science and Engineering: A. – 2008. – Vol. 483. – P. 223–227. – doi: 10.1016/j.msea.2006.11.165.

3. Zuev L.B. Autowave processes of the localization of plastic flow in active media subjected to deformation // Physics of Metals and Metallography. – 2017. – Vol. 118, iss. 8. – P. 810–819. – doi: 10.1134/S0031918X17060114.

4. Zuev L.B., Gorbatenko V.V. On the activity of deforming medium // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1783. – P. 020238. – doi: 10.1063/1.4966532.

5. Orlova D.V., Barannikova S.A., Zuev L.B. On the kinetics of localized plasticity domains emergent at the pre-failure stage of deformation process // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1783. – P. 020168. – doi: 10.1063/1.4966461.

6. Egorushkin V.E., Panin V.E., Panin A.V. Influence of multiscale localized plastic flow on stress-strain patterns // Physical Mesomechanics. – 2015. – Vol. 18, iss. 1. – P. 8–12. – doi: 10.1134/S1029959915010026.

7. Panin V.E., Egorushkin V.E. Fundamental role of local curvature of crystal structure in plastic deformation and fracture of solids // AIP Conference Proceedings. – 2014. – Vol. 1623. – P. 475–478. – doi: 10.1063/1.4898985.

8. Панин В.Е., Панин А.В. Эффект поверхностного слоя в деформируемом твердом теле // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8, № 5. – С. 7–15.

9. Nondestructive characterization of the surface integrity of cold surface hardened components / D. Meyer, D. Kruse, A. Bobe, G. Goch, E. Brinksmeier // Production Engineering. – 2010. – Vol. 4. – P. 443–449. – doi: 10.1007/s11740-010-0228-3.

10. Surface hardening by strain induced martensitic transformation / E. Brinksmeier, M. Garbrecht, D. Meyer, J. Dong // Production Engineering. – 2008. – Vol. 2. – P. 109–116. – doi: 10.1007/s11740-007-0060-6.

11. Surface and subsurface alterations induced by deep rolling of hardened AISI 1060 steel / M. Abrao, B. Denkena, B. Breidenstein, T. Morke // Production Engineering. – 2014. – Vol. 8. – P. 551–558. – doi: 10.1007/s11740-014-0539-x.

12. Khalajhedayati A., Rupert T.J. Emergence of localized plasticity and failure through shear banding during microcompression of a nanocrystalline alloy // Acta Materialia. – 2014. – Vol. 65. – P. 326–337. – doi: 10.1016/j.actamat.2013.10.074.

13. Zhonghua L., Haicheng G. Hydrostatic stresses and their effect on the macroflow behavior and microfracture mechanism of two-phase alloys // Metallurgical Transactions A. – 1991. – Vol. 22, iss. 11. – P. 2695–2702. – doi: 10.1007/BF02851363.

14. Ярославцев В.М. Резание с опережающим пластическим деформированием в технологиях

утилизации металлической стружки // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. – № 07. – С. 79–88. – doi: 0.7463/0713.0567548.

15. Амбросимов С.К. Определение технологических параметров процесса деформирующе-режущего протягивания с опережающим пластическим деформированием и упругопластическим нагружением зоны резания // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 8. – С. 3–7.

16. Valiev R.Z. Nanostructured alloys: large tensile elongation // Nature Materials. – 2013. – Vol. 12, iss. 4. – P. 289–291. – doi: 10.1038/nmat3612.

17. Nanostructured high-strength molybdenum alloys with unprecedented tensile ductility / G. Liu, G.J. Zhang, F. Jiang, X.D. Ding, Y.J. Sun, J. Sun, E. Ma // Nature Materials. – 2013. – Vol. 12, iss. 4. – P. 344–350. – doi: 10.1038/nmat3544.

18. Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 400 с.

19. Патент 2557377 Российская Федерация, МПК В 24 В 39/04 (2006.01). Ролик обкатной мультирадиусный / В.Ю. Блюменштейн, А.А. Кречетов, М.С. Махалов, О.А. Останин; заявитель и патен-

тообладатель КузГТУ. – № 2013135795/02; заявл. 30.07.2013; опубл. 20.07.2015, Бюл. № 20.

20. Блюменштейн В.Ю. Механика технологического наследования как научная основа проектирования сложнопрофильных инструментов для упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – № 8. – С. 7–16.

21. Щиголев П.В. Электрохимическое и химическое полирование металлов. – М.: АН СССР, 1959. – 256 с.

22. Powder diffraction file. Data cards. Inorganic Section. Sets 1–34. – Swarthmore, Pa., USA: JSPDS – International Centre for Diffraction Data, 1948–1984.

23. Уманский Я.С., Скаков Ю.А., Иванов А.Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.

24. Васильев Л.С., Ломаев И.Л., Елсуков Е.П. К анализу механизмов деформационно-индуцированного растворения фаз в металлах // ФММ. – 2006. – Т. 102, № 2. – С. 201–213.

25. Шабашов В.А., Мукосеев А.Г., Сагарадзе В.В. Легирование углеродом ОЦК-железа при интенсивной холодной деформации // ФММ. – 2001. – Т. 91, № 1. – С. 72–78.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2018 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Structural Transformations in the Surface Layer During Multiradius Deforming Tool Processing

Valeriy Blumenstein^{1, a, *}, Vladimir Kukareko^{2, b}

¹ Kuzbass State technical University named after T.F. Gorbachev, 28 Vesennaya st., Kemerovo, 650000, Russian Federation

² The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, 12 Akademicheskaya St., Minsk, 220072, Republic of Belarus

^a <http://orcid.org/0000-0002-3711-1535>, blumenstein@rambler.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-4283-871X>, v_kukareko@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 01 February 2018

Revised: 20 February 2018

Accepted: 21 March 2018

Available online: 15 June 2018

Keywords:

Surface plastic deformation

Multiradius tool

Structure

Phase composition

Hardening

Acknowledgements:

The authors express gratitude to Ph.D. Associate Professor Makhlov M.S., Ph.D. Senior Researcher Grigorich A.N. and postgraduate student Mitrofanova K.S. for assistance with experiments performance.

ABSTRACT

Objective is to expand the technological possibilities of the process of hardening by surface plastic deformation (SPD) through the use of a multiradius roller (MP), creating a large hydrostatic pressure in the deformation zone. **Materials and methods of investigation.** Experimental ring samples Ø 60 mm were made from annealed steel 45 GOST 1050-88 taken from one delivery. The hardness of the steel was 190 HV 10. The mechanical processing involved roughing and finishing turning with small allowances of 0.25 and 0.15 mm, respectively, with the feed of 0.07 mm/cycle and a spindle speed of 1600 cycle/min was made. Next, preliminary and final grinding was carried out by the means of abrasive paper with a small grain size. This processing made it possible to exclude the influence of roughness and defective layer on the quality of the processed surface of a part. Surface plastic deformation (SPD) by a MR roller Ø 60 mm was carried out on a turning lathe using a special roller unit in two working modes, differing in the rolling force. The MP roll had the shape of a working surface profile in the form of a combination of successively located deforming elements (DE) with radii of constant magnitude disposed relative to each other with some displacement in the radial and axial directions.

Results and discussions. It is established that the processing with a MR roller results in a substantial increase in the defects density of the crystal lattice in the surface layer, an increase in its microhardness approximately in two times and also in the deformation-induced dissolution of cementite particles Fe₃C. It is shown that an increase in the rolling force of steel by means of a MR roller ensures deeper dissolution of cementite particles in the deformed surface layer and intensifies its hardening.

For citation: Blumenshtein V.Yu., Kukareko V.A. Structural transformations in the surface layer during multiradius deforming tool processing. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 75–86. doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-75-86. (In Russian).

Reference

1. Suslov A.G., Blumenstein V.Yu., Gurov R.V., Gurov R.V., Isaev A.N., Odintsov L.G., Pleshakov V.V., Fedorov V.P., Shneider Yu.G. *Tekhnologiya i instrumenty otdechno-uprochnyayushchei obrabotki detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem*. V 2 t. T. 1 [Technology and tools for finishing-hardening of parts by surface plastic deformation. In 2 vol. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2014. 480 p.
2. Zuev L.B., Danilov V.I., Barannikova S.A. Plastic flow, necking and failure in metals, alloys and ceramics. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, vol. 483, pp. 223–227. doi: 10.1016/j.msea.2006.11.165.
3. Zuev L.B. Autowave processes of the localization of plastic flow in active media subjected to deformation. *Physics of Metals and Metallography*, 2017, vol. 118, iss. 8, pp. 810–819. doi: 10.1134/S0031918X17060114.

* Corresponding author

Blumenstein Valeriy Yu., D.Sc. (Engineering), Professor,
 Kuzbass State technical University named after T.F. Gorbachev,
 28 Vesennaya st., Kemerovo, 650000, Russian Federation
 Tel.: 8 (3842) 39-63-75, e-mail: blumenstein@rambler.ru

4. Zuev L.B., Gorbatenko V.V. On the activity of deforming medium. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1783, p. 020238. doi: 10.1063/1.4966532.
5. Orlova D.V., Barannikova S.A., Zuev L.B. On the kinetics of localized plasticity domains emergent at the pre-failure stage of deformation process. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1783, p. 020168. doi: 10.1063/1.4966461.
6. Egorushkin V.E., Panin V.E., Panin A.V. Influence of multiscale localized plastic flow on stress-strain patterns. *Physical Mesomechanics*, 2015, vol. 18, iss. 1, pp. 8–12. doi: 10.1134/S1029959915010026.
7. Panin V.E., Egorushkin V.E. Fundamental role of local curvature of crystal structure in plastic deformation and fracture of solids. *AIP Conference Proceedings*, 2014, vol. 1623, pp. 475–478. doi: 10.1063/1.4898985.
8. Panin V.E., Panin A.V. Effekt poverkhnostnogo sloya v deformiruemom tverdom tele [Effect of the surface layer in a solid under deformation]. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical Mesomechanics*, 2005, vol. 8, no. 5, pp. 7–15. (In Russian).
9. D., Kruse D., Bobe A., Goch G., Brinksmeier E. Nondestructive characterization of the surface integrity of cold surface hardened components. *Production Engineering*, 2010, vol. 4, pp. 443–449. doi: 10.1007/s11740-010-0228-3.
10. Brinksmeier E., Garbrecht M., Meyer D., Dong J. Surface hardening by strain induced martensitic transformation. *Production Engineering*, 2008, vol. 2, pp. 109–116. doi: 10.1007/s11740-007-0060-6.
11. Abrao M., Denkena B., Breidenstein B., Morke T. Surface and subsurface alterations induced by deep rolling of hardened AISI 1060 steel. *Production Engineering*, 2014, vol. 8, pp. 551–558. doi: 10.1007/s11740-014-0539-x.
12. Khalajhedayati A., Rupert T.J. Emergence of localized plasticity and failure through shear banding during microcompression of a nanocrystalline alloy. *Acta Materialia*, 2014, vol. 65, pp. 326–337. doi: 10.1016/j.actamat.2013.10.074.
13. Zhonghua L., Haicheng G. Hydrostatic stresses and their effect on the macroflow behavior and microfracture mechanism of two-phase alloys. *Metallurgical Transactions A*, 1991, vol. 22, iss. 11, pp. 2695–2702. doi: 10.1007/BF02851363.
14. Yaroslavtsev V.M. Rezanie s operezhayushchim plasticheskim deformirovaniem v tekhnologiyakh utilizatsii metallicheskoj struzhki [Cutting with advanced plastic deformation in the technology of metal chip recycling]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no. 07, pp. 79–88. doi: 0.7463/0713.0567548.
15. Ambrosimov S.K. Opredelenie tekhnologicheskikh parametrov protsessa deformiruyushche-rezhushchego protyagivaniya s operezhayushchim plasticheskim deformirovaniem i uprugopla-sticheskim nagruzheniem zony rezaniya [Determination of technological parameters of the deforming-cutting broaching process with advanced plastic deformation and elastoplastic loading of the cutting zone]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, 2008, no. 8, pp. 3–7.
16. Valiev R.Z. Nanostructured alloys: large tensile elongation. *Nature Materials*, 2013, vol. 12, iss. 4, pp. 289–291. doi: 10.1038/nmat3612.
17. Liu G., Zhang G.J., Jiang F., Ding X.D., Sun Y.J., Sun J., Ma E. Nanostructured high-strength molybdenum alloys with unprecedented tensile ductility. *Nature Materials*, 2013, vol. 12, iss. 4, pp. 344–350. doi: 10.1038/nmat3544.
18. Blumenshtein V.Yu., Smelyanskii V.M. *Mekhanika tekhnologicheskogo nasledovaniya na stadiyakh obrabotki i ekspluatatsii detalei mashin* [Mechanics of technological inheritance at the stages of processing and operation of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2007. 400 p.
19. Blumenstein V.Yu., Krechetov A.A., Mahalov M.V., Ostanin O.A. *Rolik obkatnoi mul'tiradiusnyi* [Rolling multiradius roller]. Patent RF, no. 2557377, 2006.
20. Blyumenstein V.Yu. *Mekhanika tekhnologicheskogo nasledovaniya kak nauchnaya osnova dlya razrabotki slozhnykh instrumentov dlya uprochneniya poverkhnostnoj plasticheskoy deformatsii* [Mechanics of technological inheritance as scientific basis of designing complex-profile tools for hardening treatment by surface plastic deformation]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2017, no. 8, pp. 7–16.
21. Shchigolev P.V. *Elektrokhimicheskoe i khimicheskoe polirovanie metallov* [Electrochemical and chemical polishing of metals]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1959. 256 p.
22. *Powder diffraction file. Data cards. Inorganic Section. Sets 1–34.* Swarthmore, Pa., USA, JSPDS – International Centre for Diffraction Data, 1948–1984.
23. Umanskii Ya.S., Skakov Yu.A., Ivanov A.N. *Kristallografiya, rentgenografiya i elektronnaya mikroskopiya* [Crystallography, radiography and electron microscopy]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 632 p.

24. Vasil'ev L.S., Lomaev I.L., Elsukov E.P. K analizu mekhanizmov deformatsionno-indutsirovannogo rastvoreniya faz v metallakh [On the analysis of the mechanisms of the strain-induced dissolution of phases in metals]. *Fizika metallov i metallovedenie = The Physics of Metals and Metallography*, 2006, vol. 102, no. 2, pp. 201–213. (In Russian).

25. Shabashov V.A., Mukoseev A.G., Sagaradze B.B. Legirovanie uglerodom OTsK-zheleza pri intensivnoi kholodnoi deformatsii [Alloying BCC iron with carbon upon intense cold deformation]. *Fizika metallov i metallovedenie = The Physics of Metals and Metallography*, 2001, vol. 91, no. 1, pp. 72–78. (In Russian).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2018 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).