

## Металлургия и материаловедение

УДК 621.787.6.004

DOI: 10.12737/article\_5a3779ff9bec74.56692716

А.В. Киричек, С.В. Баринов, С.В. Давыдов, А.В. Яшин, А.А. Зайцев,  
А.М. Константинов

### МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В СТАЛИ 45, ВЫЗВАННЫЕ ВОЛНОВЫМ ДЕФОРМАЦИОННЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

В результате микроструктурных исследований образцов из стали 45 установлено, что с увеличением равномерности волнового деформационного упрочнения в поверхностном слое протекает ряд процессов. При небольшой равномерности упрочнения формируется развернутая на угол  $45^\circ$  волокнистая структура и глобулярный феррит. При возрастании равномерности упрочнения сначала про-

исходит выстраивание перпендикулярно деформирующему усилию зоны полного диспергирования феррита и перлита, а затем образование высокодисперсных зон в форме линз – переупрочненных областей.

**Ключевые слова:** микроструктура, упрочнение, волна деформации, феррит, перлит, равномерность, гетерогенность, глобулярность.

A. V. Kirichek, S. V. Barinov, S. V. Davydov, A. V. Yashin, A. A. Zaitsev, A. M. Konstantinov

### MICRO-STRUCTURAL CHANGES IN STEEL 45 CAUSED BY WAVE STRAIN STRENGTHENING

The application of surface plastic deformation (SPD) for the formation of a heterogeneous structure became possible with the advent of wave strain strengthening (WSS). In contrast to well-known SPD methods this method allows ensuring a required law of the distribution of solid and viscous areas at a large depth and ensures the absence of a sharp boundary between the areas with different hardness and viscosity which excludes stress concentration and does not cause micro-cracks nucleation. Earlier, with the aid of WSS one managed to increase a resistance to a contact crumbling by a factor of three – five times, and a breaking point – up to 8% on flat samples of steel 45. In the work there were carried out investigations of micro-structural changes occurred at different uniformities of the wave strain strengthening on flat samples of steel 45. As a result of investigations it was established that in a sur-

face layer from the side of a deformation source with the increase of strengthening uniformity (from  $K = 0.2$  up to  $K = 0.8$ ), because of the increase of deformation impact density per unit area of a surface the thickness decrease of the visible grain deformation area takes place. The thickness increase of visible grain deformation area on the opposite (back) side begins with the value of  $K = 0.6$  and higher. At WSS with surpassing  $K=0.2$ ;  $0.4$ , on the back side at  $K=0.8$  there is arisen a formation of fibrous textured structure in which grains are unfolded to the angle of  $38-41^\circ$ . At the wave strain strengthening with  $K=0.4$  there is determined a formation of globular ferrite in a surface layer.

**Key words:** micro-structure, strengthening, deformation wave, ferrite, pearlite, uniformity, heterogeneity, globularity.

#### Введение

Достаточно большой интерес для современной промышленности представляют гетерогенные материалы, например сочетающие высокие параметры ударной вязкости и твердости. Материалы с гетерогенной структурой, в отличие от композиционных материалов, имеют однородный химический состав, а гетерогенные свойства задаются в гомогенном материале технологически, например термообработкой (ТО) или химико-термической обработкой (ХТО). Так, в работе [1] объемным скоростным нагревом ТВЧ при упрочнении стали 20Х13 получали структуру, состоящую из мартенсита и равномерно распределенного в нем повышенного количества (18-20%) остаточного аустенита, соз-

давая тем самым гетерогенно упрочненную структуру. Это позволило повысить долговечность при действии контактных нагрузок в 3-6 раз. Гетерогенная структура, полученная ХТО - за счет нанесения лаковых масок на рабочие поверхности зубчатых колес, - позволила увеличить их контактную выносливость в 2-3 раза [2].

Применение поверхностного пластического деформирования (ППД), для создания гетерогенной структуры стало возможным с появлением волнового деформационного упрочнения (ВДУ) [3]. Данный способ, в отличие от известных методов ППД, позволяет обеспечить требуемый закон распределения твердых и вязких участков на большой глубине. Кроме того,

применение деформационного упрочнения для получения гетерогенной структуры представляется наиболее перспективным, так как ППД обеспечивает отсутствие резкой границы между участками различной твердости и вязкости, что исключает концентрацию напряжений и не провоцирует зарождение микротрещин.

Так, с помощью ВДУ удалось повысить сопротивление контактному выкрашиванию в 3-6 раз на плоских образцах из стали 45 в условиях контактной циклической усталости за счет создания в них гетерогенно упрочненной структуры волной деформации с режимами, обеспечивающими значение коэффициента перекрытия

### Материалы и методы исследований

Для достижения поставленной цели волной деформации упрочнили несколько плоских образцов из стали 45. Выбор материала образцов обоснован тем, что сталь 45 является эталонной в машиностроении и ранее на стали этой же марки установлена возможность повышения сопротивления контактному выкрашиванию и предела прочности [6]. Способ упрочнения в результате нагружения поверхности волной деформации имеет широкие технологические возможности по формированию упрочненного поверхностного слоя и позволяет создавать большую глубину (до 6...10 мм) и высокую степень упрочнения (до 6500 МПа) [3]. Особенность способа заключается в генерировании волн деформации ударной системой с промежуточным звеном и сообщении их в очаг деформации с целью упрочнения ответственных поверхностей деталей машин. Эффективность способа обеспечивается за счет полного использования энергии волны деформации в процессе упрочнения. В зависимости от требуемых параметров упрочнения поверхностного слоя подбираются элементы ударной системы, генерирующие ударный импульс требуемой амплитуды и длительности.

За счет управления параметрами волны деформации появляется возможность формировать не только равномерно упрочненный поверхностный слой, но и гетерогенно упрочненные области. Регу-

в диапазоне  $0,35 < K < 0,45$  [4-6]. Также установлено, что при упрочнении стали 45 с увеличением равномерности упрочнения (с  $K=0,1$  до  $K=0,7$ ) предел прочности увеличивается на 2,6...8%, пластичность снижается на 37%, а предел упругости повышается на 8,6...43%. Однако микроструктурные изменения, происходящие при той или иной равномерности упрочнения волной деформации, до конца ещё не исследованы.

Целью данных исследований является установление микроструктурных изменений, происходящих при различной равномерности волнового деформационного упрочнения, на примере стали 45.

лирование равномерности достигается за счет перекрытия пластических отпечатков, полученных в результате действия на материал ударных импульсов. Равномерность перекрытия пластических отпечатков оценивается через коэффициент перекрытия  $K$ . Он является комплексным технологическим параметром, связывающим размеры пластического отпечатка с кратностью деформационного воздействия. Когда края отпечатков граничат друг с другом,  $K=0$ , а при  $K=1$  происходит полное перекрытие отпечатков, удары наносятся в одно и то же место.

Для проведения микроструктурных исследований в образцах создавалось волновое деформационное упрочнение с диапазоном равномерности  $0,2 < K < 0,8$ . В качестве инструмента использовался стержневой ролик шириной 40 мм и диаметром 10 мм. Удары наносились с энергией 70 Дж.

Подготовка микрошлифов выполнялась на программируемом шлифовально-полировальном станке LS250A в автоматическом режиме. Исследования микроструктуры образцов, упрочненных волной деформации с различной равномерностью, проводились на микроскопе Leica DMI8C. Исследования проводились на базе научно-производственной лаборатории волнового деформационного и комбинированного упрочнения в аддитивных и субтрак-

тивных технологиях Брянского государст-

венного технического университета.

### Микроструктурные исследования образцов из стали 45, упрочненных волной деформации с различной равномерностью

Фотографии микроструктуры исходной, неупрочненной стали представлены на рис. 1. Неупрочненный образец из стали 45 имеет нормализованную структуру, которая представляет собой сетку феррита

(светлое) и перлита (черное), разной степени дисперсности.

На рис. 2а в верхней части поверхностного слоя образца из стали 45, упрочненного с  $K=0,2$ , произошли видимые структурные изменения толщиной  $\approx 0,2$  мм.

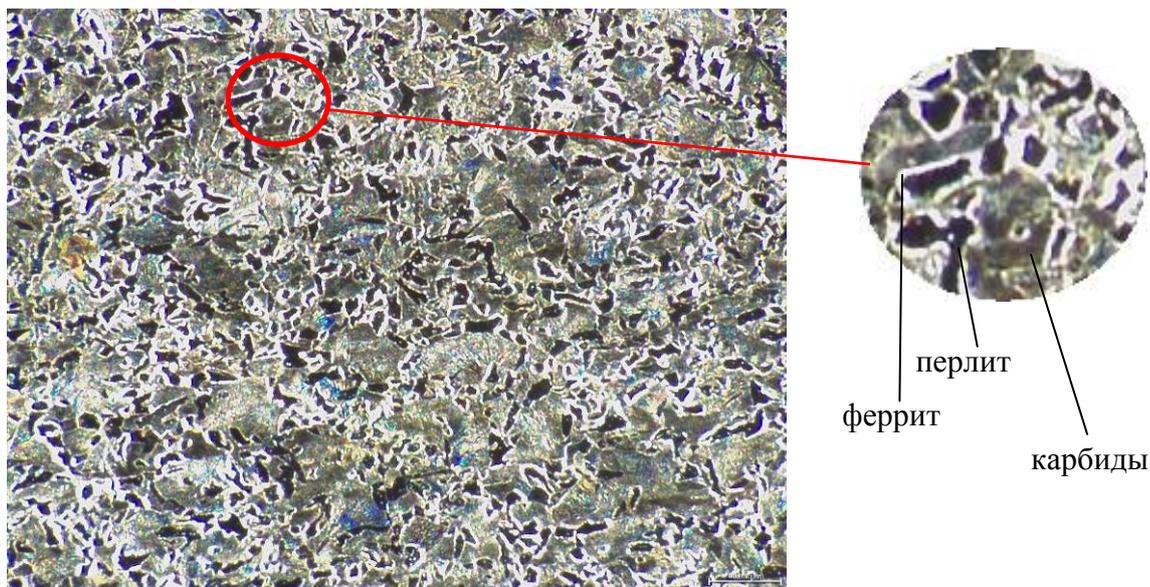


Рис. 1. Нормализованная структура неупрочненного образца из стали 45, x1000

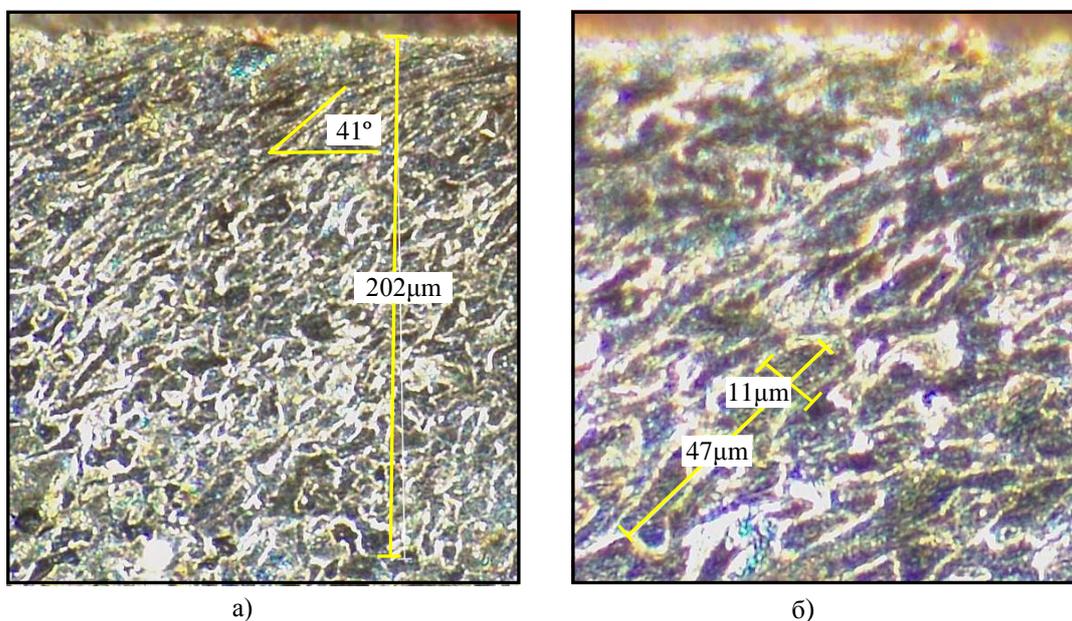


Рис. 2. Упрочненный слой образца из стали 45 ( $K=0,2$ ): а - текстурирование упрочненного слоя, x1000; б - измерение размеров ферритных зерен, x1680

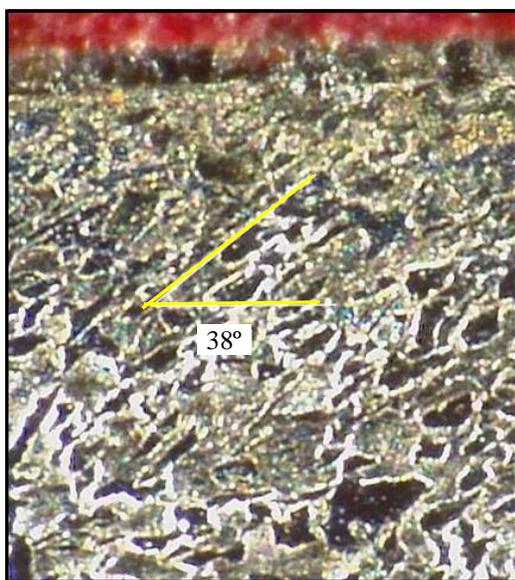
В поверхностном слое наблюдается разворот ферритных зерен практически на  $90^\circ$  (вертикально) как результат воздействия волны деформации (рис. 4) - в исход-

ной структуре они хаотичны, не вертикальны, - что свидетельствует о протекании интенсивных деформаций. В процессе деформации идет утонение и разрыв фер-

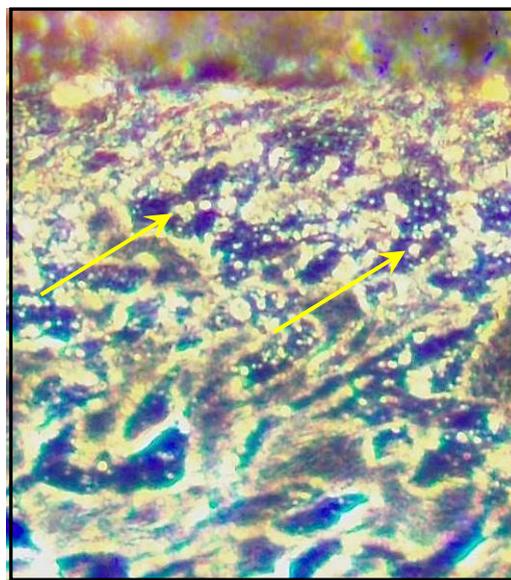
ритной оболочки перлитных колоний, а также выдавливание феррита, поскольку он более пластичен, что приводит к слиянию целых перлитных зерен (колоний) в виде нитевидных структур. Далее на глубине 0,1 мм идет образование волокнистой структуры, чередование прослоек феррита и перлита. Происходит так называемый процесс текстурирования поверхностного слоя. Данный вид структурных изменений относится к композиционному упрочнению. На рис. 2а они располагаются под углом  $40...45^\circ$ . Это связано с тем, что в процессе сжатия деформация идет под углом  $45^\circ$  (по касательным напряжениям сжатия). После толщины 0,1 мм угол направленности волокон сглаживается. Из рис. 2б видно, что травимость перлита (потемнение) резко возросла. Это говорит о разрушении в нем цементита и феррита и резком увеличении дисперсности внутренней структуры перлита. В этих зонах может наблюдаться нанофрагментирование структуры перлита, потому что пластинки феррита и перлита при термической обработке диспергированы, а за счет воздействия волны деформации происходит их дальнейшее дробление. Под упрочненной зоной (ниже 0,2 мм от поверхностного

слоя) наблюдается исходная нормализованная структура прокатного листа без изменений. В нижней (тыльной) части образца нет деформаций. Фрагментарно наблюдаются остатки текстуры деформации при прокатке (полосчатая структура, которая осталась после термообработки).

В области, упрочненной с  $K=0,4$  (рис. 3), наблюдается уменьшение толщины видимых структурных изменений в металле до  $0,07...0,14$  мм. Данное уменьшение толщины связано с увеличением скорости деформации, что ведет к формированию переупрочненной области, которая затрудняет прохождение волн деформации в глубину материала. Увеличение перекрытия до  $K=0,4$  приводит к фрагментации, дроблению ферритной оболочки на зернистые (глобулярные) структуры (рис. 3б). Одновременно с образованием глобулярного феррита, как и в образцах, упрочненных с перекрытием  $K=0,2$ , идет образование волокнистой структуры, которая располагается под углом  $38^\circ$ . В середине образца структура остается без изменения. В нижней части образца нет эффектов глобулярности и волокнистости, присутствует обычный наклеп на глубине  $0,043...0,074$  мм.



а)



б)

Рис. 3. Упрочненный слой образца из стали 45 ( $K=0,4$ ): а - текстурирование упрочненного слоя,  $\times 500$ ; б - зернистый (глобулярный) феррит,  $\times 1680$

На образце, упрочненном с перекрытием  $K=0,6$ , в поверхностном слое наблюдается зона (подслой) разрушения перлита и феррита с образованием тонкодисперсной смеси. В поверхностном слое (рис. 4а) за счет высокой скорости деформации зерна перлита и феррита начинают разру-

шаться и вытягиваться перпендикулярно деформирующему усилию, формируя зону полного диспергирования феррита и перлита, образуя, таким образом, тонкодисперсную (однородную) смесь феррита с перлитом. В исследуемом образце видимые структурные изменения происходят

на меньшей глубине по сравнению с образцами с перекрытием  $K=0,2$  и  $K=0,4$ :  $h=0,066...0,093$  мм. Сопоставление данных с данными измерений микротвердости показывает, что у образца с  $K=0,6$ , в отличие от образцов с  $K=0,2$  и  $K=0,4$ , формируется равномерно упрочненный поверхностный слой. Этому способствует образование тонкодисперсной смеси частиц феррита и цементита. На нижней стороне (рис. 4б)

также сформирована зона с видимыми структурными изменениями глубиной  $h=0,027...0,034$  мм. В ней начинается дробление зерен перлита, фрагментарно встречается глобулярность феррита. Эффект упрочнения в поверхностном слое образца с его тыльной (противоположной) стороны тот же, но скорости деформации разные.

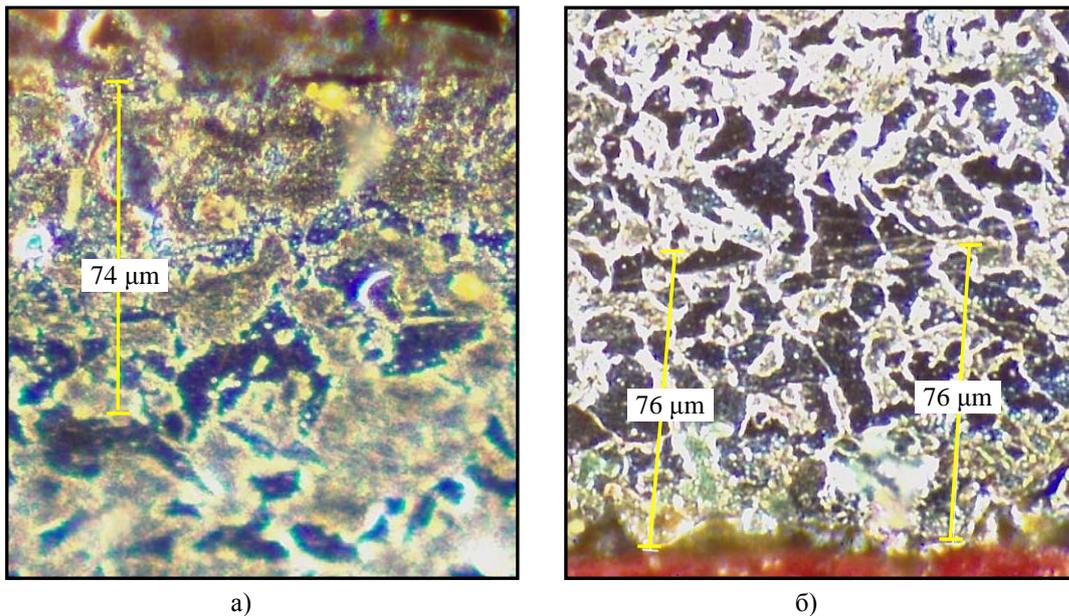


Рис. 4. Упрочненный слой образца из стали 45 ( $K=0,6$ ): а -  $\times 1680$ ; б - нижняя (тыльная) часть упрочненного образца,  $\times 1340$

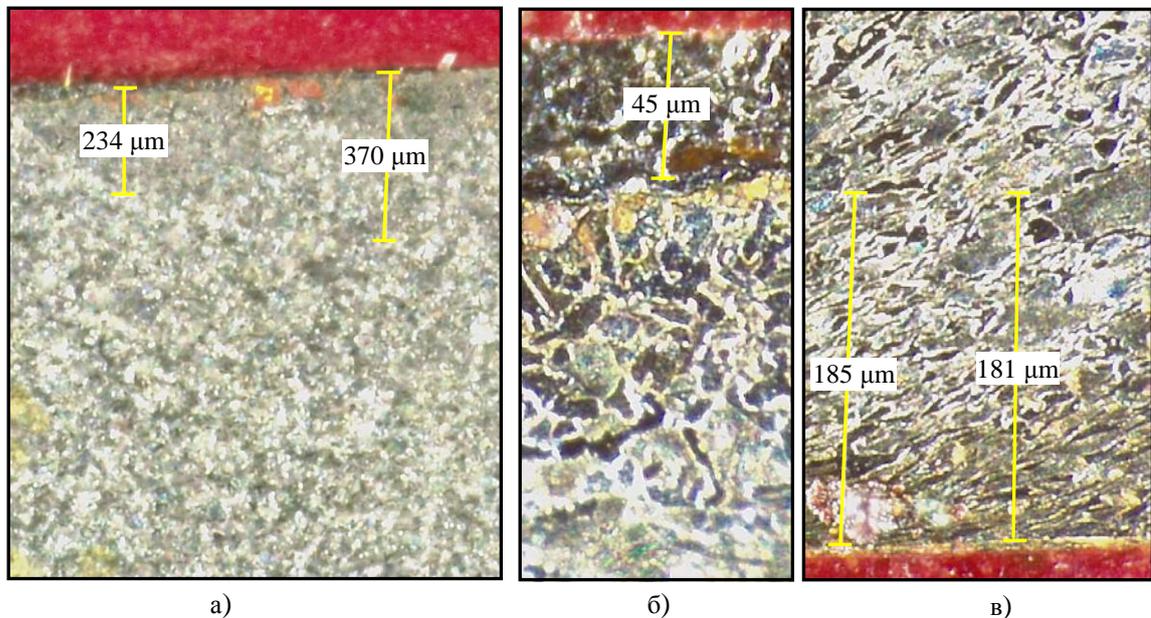


Рис. 5. Упрочненный слой образца из стали 45 ( $K=0,8$ ),  $\times 140$ :  
а - линзообразные зоны на поверхности; б - переупрочненный слой,  $\times 1000$ ;  
в - волокнистая структура в нижней (тыльной) части образца,  $\times 500$

При  $K=0,8$  в поверхностном слое присутствует структурная неоднородность

упрочненного слоя, выражаемая в образовании высокодисперсных зон в форме линз

– переупрочненных областей (рис. 5а). Между линзообразными зонами на поверхность выходит исходная, недеформированная структура (выдавленная на поверхность). В нижней части образца наблюдается волокнистая структура на глубине 0,17...0,185 мм (рис. 5в). Данная волокнистая структура похожа на структуру

образцов, упрочненных с перекрытием  $K=0,2$ . На нижней стороне образца за счет большего времени протекания процесса и меньшей, чем у поверхности, нагрузки происходит дефрагментация феррита, высокодисперсной смеси и волокнистой структуры.

### Выводы

1. Установлено, что в поверхностном слое со стороны очага деформации с увеличением равномерности упрочнения (с  $K=0,2$  до  $K=0,8$ ), вследствие увеличения плотности деформационного воздействия на единицу площади поверхности, происходит уменьшение толщины зоны видимой деформации зерен. Рост толщины зоны видимой деформации зерен с противоположной (тыльной) стороны начинается со значения  $K = 0,6$  и выше.

2. Установлено, что при ВДУ с перекрытием  $K=0,2; 0,4$  и на тыльной стороне

при  $K=0,8$  происходит образование волокнистой текстурированной структуры, в которой за счет деформации сжатия зерна развернуты на угол  $38...41^\circ$ .

3. Установлено образование в поверхностном слое глобулярного феррита при волновом деформационном упрочнении с  $K=0,4$ .

4. Установлено, что при ВДУ с  $K=0,6$  происходит образование зоны полного диспергирования феррита и перлита, расположенной в поверхностном слое перпендикулярно деформирующему усилию.

*Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ №16-38-00698 мол\_а.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 1782243 РФ. Способ термообработки изделий / А.П. Чейлях, Л.С. Малинов. - Бюл. № 46. - 1992.
2. Иванов, Г.П. Повышение износостойкости деталей созданием регулярной гетерогенной макро-структуры / Г.П. Иванов, Л.В. Картонова, А.А. Худошин // Строительные и дорожные машины. - 1997. - № 1. - С. 33-34.
3. Киричек, А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. - М.: Машиностроение, 2004. - 288 с. (Б-ка технолога).
4. Kirichek, A.V. The investigation of the deformation wave hardening effect on the strength of the medium and low alloy steels / A.V. Kirichek, S.V. Ba-

rinov, A.V. Yashin, S.E. Kolontsov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. - 2017. - Vol. 177. - 012121 (5 p.).

5. Kirichek, A.V. Increasing durability by deformational hardening under the conditions of back-to-back endurance by creating heterogeneous patterns / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, A.V. Yashin // IOP: Conference Series. Materials Science and Engineering. - 2016. - № 124. - 011001 (4 p.).
6. Киричек, А.В. Повышение контактной выносливости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов, С.А. Силантьев // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2008. - № 7 (43). - С. 9-15.

1. Pat. 1782243 the RF. Method of product thermal processing / A.P. Cheilyakh, L.S. Malinov. - Bull. No. 46. - 1992.
2. Ivanov, G.P. Parts wear resistance increase by formation of regular heterogeneous macro-structure / G.P. Ivanov, L.V. Kartonova, A.A. Khudoshin // Construction and Road Machines. - 1997. - No.1. - pp. 33-34.
3. Kirichek, A.V. Technology and Equipment for Static-Pulse Processing with Surface Plastic Deformation / A.V. Kirichek, D.L. Soloviyov, A.G. La-

zutkin. - M.: Mechanical Engineering, 2004. - pp. 288. (Technologist's Library).

4. Kirichek, A.V. The investigation of the deformation wave hardening effect on the strength of the medium and low alloy steels / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, A.V. Yashin, S.E. Kolontsov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. - 2017. - Vol. 177. - 012121 (5 p.).
5. Kirichek, A.V. Increasing durability by deformational hardening under the conditions of back-to-back endurance by creating heterogeneous patterns / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, A.V. Yashin // IOP:

Conference Series. Materials Science and Engineering. - 2016. - № 124. - 011001 (4 p.).

6. Kirichek, A.V. Increase of contact endurance in machinery by heterogeneous strain strengthening

with static-pulse processing / A.V. Kirichek, D.L. Soloviyov, S.V. Barinov, S.A. Silantiev // Strengthening Technologies and Coatings. – 2008. – No.7 (43). – pp. 9-15.

*Статья поступила в редколлегию 16.11.17.*

*Рецензент: д.т.н., профессор МИ ВлГУ*

*Жизняков А.Л.*

#### Сведения об авторах:

**Киричек Андрей Викторович**, д.т.н., профессор, проректор по перспективному развитию Брянского государственного технического университета, e-mail: [avk.57@yandex.ru](mailto:avk.57@yandex.ru).

**Баринов Сергей Владимирович**, к.т.н., доцент, зав. кафедрой автоматизированного проектирования машин Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: [box64@rambler.ru](mailto:box64@rambler.ru).

**Яшин Александр Васильевич**, зав. лабораториями кафедры ТМС Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им.

А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: [yashin2102@yandex.ru](mailto:yashin2102@yandex.ru).

**Давыдов Сергей Васильевич**, д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета, e-mail: [fulleren\\_grafen@mail.ru](mailto:fulleren_grafen@mail.ru).

**Зайцев Алексей Андреевич**, студент кафедры ТМС Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: [apmitp@yandex.ru](mailto:apmitp@yandex.ru).

**Константинов Александр Михайлович**, студент кафедры ТМС Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: [apmitp@yandex.ru](mailto:apmitp@yandex.ru).

**Kirichek Andrey Victorovich**, D. Eng., Prof., Pro-Rector for Promising Development of Bryansk State Technical University, e-mail: [avk.57@yandex.ru](mailto:avk.57@yandex.ru).

**Barinov Sergey Vladimirovich**, Can. Eng., Assistant Prof., Head of CAD Dep., Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: [box64@rambler.ru](mailto:box64@rambler.ru).

**Yashin Alexander Vasilievich**, Head of the Lab. of ET Dep., Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: [yashin2102@yandex.ru](mailto:yashin2102@yandex.ru).

**Davydov Sergey Vasilievich**, D. Eng., Prof. of Bryansk State Technical University, e-mail: [fulleren\\_grafen@mail.ru](mailto:fulleren_grafen@mail.ru).

**Zaitsev Alexey Andreyevich**, Student of ET Dep., Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: [apmitp@yandex.ru](mailto:apmitp@yandex.ru).

**Konstantinov Alexander Mikhailovich**, Student of ET Dep., Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: [apmitp@yandex.ru](mailto:apmitp@yandex.ru).